FONDO PIZZOFALCONE

31-B-38

BIBLIOTECA PROVINCIALE

Armadio 4

Palchetto D

Num.° d' ordine 21

31-B-38

NAZIONALE
B. Prov.
11
671
NAPOLI
R. BIBLIOTECA
VITT. EM. III

C3-Gr.1.
II
671

Digitized by Google

C09848 SAN

TRAITÉ
ÉLÉMENTAIRE
DE
PHYSIQUE,

PAR M. L'ABBÉ HAÜY,

Chanoine Honoraire de l'Eglise Métropolitaine de Paris, Membre de la Légion d'Honneur, de l'Institut des Sciences et Arts; Professeur de Minéralogie au Muséum d'Histoire Naturelle; de l'Académie Royale des Sciences et de la Société des Scrutateurs de la Nature, de Berlin; de l'Université Impériale de Wilna; de la Société de Minéralogie d'Iena; de la Société Italienne des Sciences; de la Société Batave des Sciences de Harlem, etc.

SECONDE ÉDITION,

REVUE ET CONSIDÉRABLEMENT AUGMENTÉE.

TOME II.

A PARIS,

Chez COURCIER, Imprimeur-Libr. pour les Mathématiques, quai des Augustins, n° 57.

1806.

BIBLIOTECA NAZIONALE "VITTORIO EMANUELE III" NAPOLI

AVIS.

Tous Exemplaires qui ne porteraient pas comme ci-dessous la signature de l'Editeur, seront contrefaits. Les mesures nécessaires seront prises pour atteindre, conformément à la loi, les fabricateurs et les débitans de ces Exemplaires.

J. Pachelier & Cie.

TRAITÉ
ÉLÉMENTAIRE
DE
PHYSIQUE.

SUITE DE LA THÉORIE DE L'ÉLECTRICITÉ.

4. De l'Electricité Galvanique.

626. L'ÉLECTRICITÉ, enrichie par les travaux de tant de physiciens distingués, semblait être arrivée au terme où une science n'a plus de pas importans à faire, et ne laisse à ceux qui la cultiveront dans la suite, que l'espoir de confirmer les découvertes de leurs prédécesseurs, et de répandre un plus grand jour sur les vérités dévoilées. On eût cru que toutes les recherches pour diversifier les résultats de l'expérience étaient épuisées, et que la théorie elle-même ne pouvait plus s'accroître, qu'en ajoutant un nouveau degré de précision aux applications des principes déjà connus. Tandis que la science paraissait tendre ainsi vers le repos, les phénomènes des mouvemens convulsifs, observés par Galvani dans les muscles d'une grenouille mis en communication avec des métaux, vinrent s'offrir

à l'attention et à l'étonnement des physiciens, avec des caractères faits pour en imposer sur le mécanisme qui les produisait. Mais au moins l'électricité fut nommée dans les premières explications qu'on essaya d'en donner. Tous les esprits se tournèrent dès lors vers cette nouvelle branche de Physique. On varia, ou plutôt on accumula les expériences; et les phénomènes, qui d'abord avaient été bornés à jouer un rôle dans l'économie animale, passèrent depuis dans le domaine de la chimie, où leur manière d'opérer la décomposition de l'eau devint, pour plusieurs savans, un sujet de douter que le fluide électrique fût ici le véritable agent.

Pendant que les incertitudes se multipliaient avec les discussions, Volta, placé au sein de cette même Italie, qui avait été comme le berceau des nouvelles connaissances, découvrit le principe de leur véritable théorie, dans un fait également remarquable par sa simplicité et par sa fécondité, en ce qu'il ramène l'explication de tous les phénomènes au simple contact de deux substances de différentes natures. La doctrine de cet homme célèbre se répandit d'abord dans les pays étrangers, et n'a été bien connue en France que depuis l'époque à laquelle il est venu lui-même la développer en présence de l'Institut national. On se rappellera toujours cette séance, où il fut accueilli avec tant d'intérêt par un Héros que les savans ambitionnent de voir au milieu d'eux, comme les guerriers de le voir à leur tête, et où cet accueil fut suivi d'une distinction qui a doublé la gloire attachée à la découverte elle-même (1).

---

(1) Dans la séance tenue le 16 brumaire an 9, par la Classe des Sciences Mathématiques et Physiques de l'Institut national, Sa Majesté l'Empereur et Roi, après la lecture d'un Mémoire où Volta exposait sa découverte, proposa de décerner une médaille d'or à ce physicien. Le 11 frimaire suivant, la Classe adopta unanimement l'avis de la Commission nommée à cet effet, qui était d'offrir à Volta la médaille de l'Institut, en or, comme un témoignage de la satisfaction de la Classe, pour les belles découvertes dont il venait d'enrichir la théorie de l'électricité, et comme une preuve de sa reconnaissance pour les lui avoir communiquées. Dans la séance du 26 prairial an 10, le Ministre de l'Intérieur, Chaptal, communiqua à la même Classe une lettre,

Nous allons exposer d'abord les phénomènes qui ont donné naissance à l'électricité appelée *galvanique;* nous ferons connaître ensuite la théorie à l'aide de laquelle Volta est parvenu à les expliquer; de là nous passerons à d'autres phénomènes qui, comme les premiers, tiennent à l'économie animale, mais qui sont produits par les mouvemens spontanés de certains poissons, dont le plus connu est la torpille; enfin nous considérerons l'électricité galvanique sous les rapports qui la lient avec la chimie par la décomposition de l'eau.

Origine de l'Electricité Galvanique.

627. Les premières traces de l'espèce d'électricité dont il s'agit ici, se trouvent dans le récit que Sulzer a publié en 1767, de l'expérience suivante, aujourd'hui très-connue. On prend deux pièces de deux métaux différens, tels que le plomb et l'argent; on en place une sur la langue et l'autre en dessous, de manière qu'elles dépassent le bout de cet organe, puis on les incline l'une vers l'autre par leurs extrémités saillantes, jusqu'à ce qu'elles se touchent; au moment du contact, on éprouve une saveur que Sulzer compare à celle qu'excite le sulfate de fer. Il en conclut que la jonction des deux métaux opère dans l'un ou l'autre, ou dans tous les deux, une vibration de leurs particules, qui doit nécessairement agir sur les nerfs de la langue, et y produire la sensation dont nous avons parlé. Il arrive assez souvent à ceux qui font cette expérience,

---

par laquelle l'Empereur témoignait qu'il avait intention de fonder un prix consistant en une médaille de trois mille francs pour la meilleure expérience qui serait faite, dans le cours de chaque année, sur le fluide galvanique; et que de plus, il désirait donner en encouragement une somme de soixante mille francs à celui qui, par ses expériences et ses découvertes, ferait faire à l'électricité et au galvanisme un pas comparable à celui qu'ont fait faire à ces sciences Francklin et Volta, et ce, au jugement de la Classe. Le programme relatif à ces deux prix, rédigé par une nouvelle Commission, a été lu dans la séance publique tenue par l'Institut national, le 17 messidor de la même année

d'être en même temps affectés par une espèce de lueur qui semble leur passer devant les yeux.

628. Le phénomène que nous venons de citer, quoique du même genre que ceux qui appartiennent à la nouvelle branche d'électricité, n'eut d'abord aucune suite. Ce ne fut qu'en 1789 qu'un autre fait, amené par le hasard, donna l'impulsion aux esprits pour se porter vers une carrière où tant de résultats intéressans les attendaient. Un étudiant en médecine, de Bologne, était occupé à disséquer une souris vivante, qu'il tenait d'une main dans une position fixe, lorsque ayant touché un des nerfs avec son scalpel, il ressentit aussitôt une commotion semblable à celle que produit l'électricité (1). Ce fait, dont le bruit se répandit en Italie, donna lieu à diverses conjectures sur la nature de l'agent dont il dépendait, et que plusieurs physiciens regardèrent comme étant le fluide nerveux, qu'ils identifiaient avec le fluide électrique.

629. Peu de temps après, un nouveau phénomène se présenta, et d'une manière encore inattendue, chez Galvani, professeur d'anatomie dans la même ville. On avait placé sur une table où se trouvait une machine électrique, des grenouilles écorchées que l'on destinait à faire des bouillons. Un élève s'avisa d'approcher la pointe d'un scalpel des nerfs cruraux d'un de ces animaux ; à l'instant tous les muscles de la grenouille éprouvèrent de fortes convulsions. Un autre élève crut avoir remarqué que cet effet avait eu lieu au moment où l'on tirait une étincelle du conducteur de la machine. Galvani, qui alors était occupé d'un objet différent, ayant été averti de ce qui venait de se passer, répéta l'expérience, tantôt en faisant de même concourir l'étincelle électrique avec l'application de la pointe du scalpel sur les nerfs de la grenouille, tantôt en employant séparément, soit l'action de la machine, soit celle du scalpel, et il vit que les contractions n'avaient plus lieu dans ce dernier cas, et que l'étincelle suffisait pour

(1) Essai sur l'Histoire générale des Sciences, pendant la Révolution française, par J.-B. Biot, p. 19.

les faire naître (1). On conçoit aisément que les grenouilles se trouvant dans la sphère d'activité de la machine, et n'étant pas isolées, devaient acquérir l'électricité résineuse, pendant que la machine était en jeu. Venait-on à tirer une étincelle du conducteur ? la rentrée subite du fluide vitré dans le corps de la grenouille, déterminait un effet semblable à celui qui est connu sous le nom de *choc en retour* (613).

Galvani varia l'expérience de plusieurs manières ; il se servit de l'électrophore et de divers appareils ; il essaya même l'action produite par l'électricité de la foudre ; et dans tous les cas où les moyens qu'il employait se trouvèrent propres à mettre en activité une certaine quantité de fluide électrique, il obtint des effets analogues.

630. Jusqu'ici ce physicien s'était agité vainement, pour chercher quelque chose de nouveau dans des phénomènes, où des connaissances plus approfondies ne lui auraient laissé apercevoir que des résultats de l'électricité ordinaire. Toutes ses tentatives n'avaient abouti qu'à manifester l'extrême susceptibilité des animaux à sang froid relativement à l'action électrique, et s'il y avait ici un fait remarquable, il n'intéressait que la physiologie. Un jour qu'il tenait une grenouille suspendue par la moelle épinière à un crochet de cuivre, il lui vint en idée de presser ce crochet contre les barreaux de fer d'un balcon, et en répétant cette opération, il vit plus d'une fois les muscles de la grenouille entrer en contraction ; et peu s'en fallut qu'il ne s'éblouît sur cette heureuse indication, en rejetant la cause du phénomène sur l'électricité de l'atmosphère (2). Mais ayant transporté la grenouille dans un appartement dont les fenêtres étaient fermées, il la plaça sur une plaque de fer, et tandis qu'il pressait contre cette plaque le crochet auquel était attachée la grenouille, il vit les contractions se renouveler. Une suite

(1) *Aloysii Galvani, de Viribus Electricit., in motu musculari Commentar.*, p. 2.

(2) *Ibid.*, p. 17.

d'expériences du même genre le conduisit à écarter tout ce qui était étranger au phénomène, et à circonscrire l'appareil dans ses véritables limites, en réduisant tout à une communication établie entre les muscles et les nerfs d'une grenouille, par le moyen d'un arc métallique.

631. Galvani avait remarqué que quand cet arc n'était formé que d'un métal, les contractions étaient ou nulles ou très-légères, et que pour les rendre fortes et durables, il fallait employer un arc composé de deux métaux différens (1). Une autre observation, non moins importante, qui est due au même physicien, consiste en ce que pour exciter des contractions dans la grenouille, il n'est pas indispensable de faire intervenir l'action d'un corps étranger. Lorsque les grenouilles sont fraîches, et que leur irritabilité jouit de toute son énergie, il suffit de mettre les muscles cruraux en contact avec les nerfs lombaires, pour obtenir des effets sensibles (2). Aldini, neveu de Galvani, et l'un de ses collaborateurs, a vérifié ce fait, depuis peu, dans des expériences entreprises sur de grands animaux, et sur des hommes dont la mort était récente.

632. Reprenons maintenant, avec plus de détail, les résultats obtenus par Galvani, en y joignant ceux des autres physiciens qui se sont occupés des mêmes expériences. Le but général de ces expériences est d'établir, au moyen d'un conducteur composé ordinairement de plusieurs métaux différens, une communication entre deux points de l'animal, pris dans une suite d'organes nerveux ou musculaires. On a nommé *arc animal* la partie de ces organes située entre les points de contact, et *arc excitateur* les substances métalliques, à l'aide desquelles ces mêmes points sont mis en communication.

633. Les organes que l'on a choisis de préférence pour les soumettre à l'expérience, sont les nerfs cruraux et les muscles de la même partie, dans lesquels les premiers se distribuent.

---

(1) *Aloysii Galvani*, et., *Commentar.*, p. 20.

(2) Histoire du Galvanisme, par Sue, t. I, p. 138.

Lorsqu'on a mis, par exemple, un nerf crural à nu, si l'on place une feuille de plomb au-dessous de ce nerf, puis une feuille d'argent sous la cuisse située du même côté, et qu'ensuite on établisse la communication entre le plomb et l'argent, au moyen d'un excitateur de cuivre, les muscles cruraux éprouveront, au moment du contact, une forte contraction, qui se manifestera par un mouvement convulsif de la cuisse et de la jambe.

634. Si l'on place un des supports à l'extrémité du nerf, et l'autre sur le milieu du même nerf, le double contact de l'arc excitateur produira également des convulsions dans la cuisse et la jambe voisine.

635. Si on laisse la grenouille revêtue de sa peau, et qu'après l'avoir fixée on place une feuille de plomb sur le ventre et une d'argent sur le bassin, les mouvemens convulsifs auront encore lieu, par le double contact de l'arc excitateur, mais ils seront beaucoup plus faibles.

636. On peut supprimer un des supports, par exemple, celui du nerf, et se contenter de mettre en contact ce nerf nu avec une des extrémités de l'arc excitateur, tandis que l'autre extrémité va toucher la feuille d'argent placée en dessous du muscle. Les convulsions ont lieu pour celui-ci, comme dans le cas de deux supports.

637. Enfin, on réussira encore à produire les convulsions, en plaçant le nerf et le muscle sur des pièces faites d'un même métal, et en rapprochant ensuite ces pièces l'une de l'autre jusqu'au contact. Mais alors les commotions sont moins sensibles; on ne les obtient pas indifféremment par tous les temps, et elles deviennent nulles, si les grenouilles sont faibles ou fatiguées.

Les détails relatifs à une belle suite d'expériences de ce genre, exécutées avec autant de sagacité que de soin, se trouvent consignés dans un rapport fait par le célèbre Hallé, à la classe des Sciences Mathématiques et Physiques de l'Institut National, au nom de la commission nommée pour examiner et vérifier les phénomènes du galvanisme.

On ne connaissait pas encore à cette époque la théorie de Volta sur le même sujet, et il ne sera pas indifférent de reprendre ici plusieurs circonstances particulières qui s'étaient offertes à Hallé et à d'autres physiciens, dans le cours des expériences entreprises sur les grenouilles, et qui ont dû faire naître une surprise que les résultats du célèbre physicien de Pavie ont dissipée.

638. Nous avons déjà dit que pour mieux assurer le succès de ces expériences, il était nécessaire de composer l'arc métallique de plusieurs métaux différens. Ainsi, dans la première expérience que nous avons citée, l'arc métallique était formé d'une lame de plomb, d'une pièce d'argent, et d'un conducteur de cuivre. On pouvait encore réussir, en composant l'arc métallique seulement de deux pièces, pourvu qu'elles différassent au moins en quelque chose par leur nature ; et ici de simples nuances qu'on aurait été tenté de regarder comme d'une légère conséquence, semblaient faire la loi aux résultats.

Vailli, que l'on pourrait regarder comme le successeur de Galvani, relativement aux recherches sur la nouvelle branche d'électricité, avait observé que quand les deux pièces dont on armait les organes de la grenouille étaient faites avec du plomb de vitrier, un arc excitateur du même plomb ne produisait aucun effet ; mais si on substituait du plomb d'essai, qui est toujours beaucoup plus pur, à une des armures seulement, et que l'on continuât d'employer un excitateur fait avec du plomb de vitrier, ainsi que l'autre armure, les convulsions reparaissaient. Hallé, pour déterminer une différence entre deux métaux, qui étaient d'ailleurs identiques, se contentait d'en frotter un avec quelqu'autre métal. Ainsi, il plaçait sous le nerf une plaque d'argent qui était intacte, et sous le muscle une autre plaque du même métal, frottée auparavant avec du cuivre, de manière que la partie qui avait subi le frottement fût en contact avec l'organe, et il suffisait de réunir les deux plaques pour obtenir un effet sensible. Dans une autre expérience, il combina une plaque d'argent pur, avec une seconde, où le même métal était allié seulement

de $\frac{1}{10}$ d'un métal différent, et les convulsions se manifestèrent. Les faits suivans méritent encore de fixer l'attention : une des armures étant d'argent, et l'autre de plomb, l'expérience a réussi avec un excitateur de plomb, mais elle a manqué, lorsque les deux armures étant d'argent, on s'est servi d'un excitateur de cuivre. De là il résultait qu'une différence quelconque entre les métaux qui composaient l'arc excitateur, donnait à cet arc une influence très-marquée sur les phénomènes. Mais il fallait éviter d'employer des supports parfaitement identiques, lors même que l'excitateur était d'un métal différent. Nous verrons bientôt que ces effets, qui paraissaient si difficiles à concevoir, tenaient de si près au véritable principe de la théorie, qu'il serait difficile de choisir des expériences plus propres à le vérifier et à en faire des applications intéressantes.

Premières Théories relatives à l'Electricité Galvanique.

639. Donnons maintenant une idée de la manière dont on a d'abord envisagé la cause des phénomènes que nous venons d'exposer. Galvani les faisait dépendre de ce qu'il appelait le *fluide nerveux électrique*, et pensait que les convulsions qu'éprouvait la grenouille, semblables à la commotion que produit la bouteille de Leyde, avaient lieu par un rétablissement d'équilibre entre deux électricités opposées, l'une positive, l'autre négative. Et comme il avait quelquefois observé qu'un arc formé d'un seul métal agissait sur la grenouille, il ne lui paraissait nullement naturel d'imaginer que ce métal unique pût être le siége des deux électricités, et ainsi il ne restait, selon lui, d'autre parti à prendre que de les placer dans l'animal lui-même (1).

Il s'agissait ensuite de savoir si l'une de ces électricités résí-

(1) *De Viribus Electricit., in motu musculari Commentar*; pp. 21 et 29.

dait dans le muscle, et l'autre dans le nerf, ou si elles existaient simultanément dans chacun des deux organes. Galvani, après avoir tenté inutilement de résoudre la question par des expériences décisives, s'arrêta à l'hypothèse qui lui parut la plus vraisemblable. Suivant cette hypothèse, le muscle était le siége des deux électricités; sa partie intérieure se trouvait dans l'état positif, tandis que sa surface extérieure était négative. C'était comme une petite bouteille de Leyde, toujours prête à se décharger. Les nerfs qui communiquent avec les muscles faisaient simplement l'office de conducteurs. L'électricité positive passait de l'intérieur du muscle, d'abord dans le nerf, et ensuite dans l'arc excitateur, qui la transmettait à la surface extérieure du muscle, et cette décharge, analogue à celle qui a lieu dans l'expérience de Leyde, produisait la commotion (1).

640. Vailli adoptait aussi le concours des deux électricités dans le phénomène des contractions musculaires, avec cette différence, qu'il regardait l'intérieur des muscles comme étant électrisé négativement, et l'extérieur comme étant à l'état positif (2).

641. Volta s'était d'abord déclaré lui-même en faveur de cette existence d'une double électricité inhérente à l'animal; mais il pensait qu'elle agissait d'une manière différente. Ce célèbre physicien prit une bouteille de Leyde très-faiblement chargée; il mit le crochet de cet instrument en contact avec les nerfs d'une grenouille, et fit communiquer la garniture extérieure avec les muscles. Il crut appercevoir que, dans ce cas, la grenouille recevait des impressions, tandis qu'elle paraissait insensible lorsqu'on présentait la bouteille en sens contraire aux deux organes. Il fut porté à en conclure que les nerfs étaient le siége de l'électricité négative, et les muscles

(1) *De Viribus Electricit., in motu musculari Commentar.*, p. 40 et suiv.

(2) Histoire de l'Electricité, t. I, p. 58.

celui de l'électricité positive (1). Galvani ayant eu connaissance de cette explication, la trouva si plausible qu'il se rendit, en avouant néanmoins qu'elle lui semblait laisser encore quelques doutes à éclaircir (2). Mais la science réservait à Volta une victoire plus digne de lui.

642. Un de ceux qui ait attaqué avec le plus d'avantage la théorie de Galvani, est le savant Pfaff, professeur à Kiel. Il prouva qu'il s'en fallait de beaucoup que la comparaison entre les organes de la grenouille et la bouteille de Leyde, fût exacte sous tous les rapports. Il citait, entre autres expériences, celle où les deux armures étant appliquées sur le nerf, les contractions ne laissaient pas de se manifester, quoique, dans ce cas, l'arc excitateur qui produisait la décharge reposât, par ses extrémités, sur le conducteur de la prétendue machine électrique. Il est facile de juger que cette observation attaquait également toutes les autres manières de concevoir le phénomène, qui jusqu'alors avaient été proposées.

Théorie de Volta.

643. Dans les premières expériences entreprises par Galvani, les effets étaient dus à l'influence de l'électricité ordinaire sur les organes d'une grenouille. Galvani écarta bientôt cette influence, et réduisit tout à une combinaison des mêmes organes et d'un arc métallique. Rien ne paraissait alors si simple que cet appareil. Mais le moment n'était pas arrivé, où Volta devait annoncer aux physiciens qu'il ne fallait que des métaux pour mettre en évidence le véritable principe de la théorie. Nous allons essayer de développer les principes de ce savant célèbre, tels qu'il les a communiqués à l'Institut national.

---

(1) *Voyez* la Lettre de Carminati à Galvani, insérée p. 67 et suiv., dans le Commentaire déjà cité.

(2) *Voyez* la Réponse de Galvani, à la fin du même ouvrage.

Action mutuelle de deux Métaux au contact.

644. On avait cru que, dans les expériences auxquelles on soumettait les grenouilles, l'impulsion donnée à l'électricité dépendait de l'arc animal. Il ne sert, au contraire, qu'à la recevoir et à en manifester l'effet, et la véritable cause réside dans l'arc métallique. On avait remarqué que, dans cet arc, la réunion de deux métaux de différente nature était une circonstance importante pour le succès des expériences. Elle l'est au point que c'est le contact de ces métaux qui détermine l'action électrique. Voici donc le fait principal d'où dérivent tous les autres.

645. Si deux métaux différens, isolés, et n'ayant que leur fluide électrique naturel, sont mis en contact, ils se constituent dans deux états opposés d'électricité, de manière que si on les sépare ensuite, l'un donnera des signes d'électricité vitrée, et l'autre des signes d'électricité résineuse. Supposons, par exemple, que l'on applique l'un contre l'autre deux disques, l'un *z* de zinc, l'autre *c* de cuivre (*fig.* 67, Pl. 5), attachés par le milieu de leurs surfaces opposées au contact à des cylindres de verre *df*, *ab*, dont l'observateur tienne les extrémités dans ses mains, pour que les disques restent isolés. Le zinc, dans ce cas, acquerra l'électricité vitrée, et le cuivre l'électricité résineuse. C'est ce dont on pourra s'assurer, à l'aide du condensateur (*fig.* 68) que nous avons déjà décrit (607). Après avoir séparé les deux disques, on portera celui de zinc sur le bouton *g*, et en même temps on touchera avec celui de cuivre quelqu'un des corps environnans, pour remettre ce disque dans l'état naturel. On répétera cette opération un certain nombre de fois, afin d'accumuler dans le plateau collecteur, les petites quantités de fluide vitré qu'acquiert le zinc chaque fois qu'on applique les deux disques l'un contre l'autre. Si l'on enlève ensuite le plateau supérieur *ab*, les pailles de l'électromètre s'écarteront, et la proximité d'un bâton de cire d'Espagne électrisé par le frottement, indiquera

dans ces pailles une électricité vitrée, en les déterminant à se rapprocher. Si l'on recommence l'expérience, et que l'on substitue le disque de cuivre à celui de zinc, en le mettant en contact avec le bouton g, après chaque application des deux disques, on trouvera que l'électricité des pailles est résineuse.

646. Pour faciliter l'explication des phénomènes, nous représenterons par l'unité la somme des deux électricités vitrée et résineuse, dont l'une appartient au zinc, et l'autre au cuivre ; cette somme, partagée également entre les deux disques, donne $\frac{1}{2}$ pour la quantité de fluide de chacun d'eux ; et si, pour distinguer la fraction qui indique l'électricité résineuse, nous lui donnons le signe négatif, l'état du zinc sera exprimé par $+\frac{1}{2}$, et celui du cuivre par $-\frac{1}{2}$. Nous verrons bientôt que les quantités absolues de fluide peuvent varier dans les deux métaux, par l'effet de certaines circonstances. Mais la différence 1 entre les états des deux disques reste constamment la même.

Cette manière d'exprimer les états des deux disques suppose qu'ils soient isolés. Mais concevons qu'au moment même où ils le sont, on établisse une communication entre le disque de cuivre et les corps environnans ; alors ce disque tendra à reprendre au sol une quantité d'électricité vitrée propre à neutraliser son électricité résineuse ; d'où il suit que son nouvel état sera représenté par zéro. Mais si le zinc dont l'état était $+\frac{1}{2}$, n'éprouvait en même temps aucun changement, la différence entre les états des deux disques serait simplement $\frac{1}{2}$; or, d'après ce que nous avons dit, elle doit être égale à l'unité : ainsi, pour que cette condition ait lieu, le zinc acquerra, aux dépens du sol, une nouvelle quantité de fluide vitré égale à celle qu'il avait déjà ; ensorte que l'état du cuivre étant toujours zéro, celui du zinc sera représenté par l'unité.

Si, au contraire, c'était le disque de zinc qui fût en communication avec les corps environnans, son état deviendrait zéro, et celui du cuivre serait -1, comme il est facile de le concevoir.

Effet des Conducteurs humides.

647. Introduisons maintenant dans l'appareil des corps humectés d'eau, et voyons ce qui doit en résulter. Selon Volta, lorsqu'un de ces corps est placé entre deux métaux, son effet se borne, au moins sensiblement, à transmettre le fluide d'un métal à l'autre, et alors la répartition se fait comme dans les cas ordinaires, c'est-à-dire, que si les métaux sont semblables par leurs formes et égaux en surface, il y aura de même égalité entre leurs quantités de fluide, après la communication.

Ainsi, il y a deux cas d'équilibre, l'un au contact, qui exige une différence d'état égale à une constante entre les métaux différens par leur nature, l'autre à distance, avec interposition d'un corps humide, qui exige, toutes choses égales d'ailleurs, que les métaux soient dans le même état électrique.

648. Les expériences suivantes offrent, d'une manière très-sensible, ces deux cas d'équilibre. On prend une lame métallique formée de deux morceaux, l'un de zinc, l'autre de cuivre, soudés bout à bout; et, tandis que l'on tient à la main l'extrémité cuivre, on touche, avec l'extrémité zinc, le bouton g du plateau collecteur qui est de cuivre. Si l'on enlève ensuite le plateau non-isolé, les pailles de l'électromètre ne donneront aucun signe d'électricité. Car l'état du cuivre que l'on tient à la main étant zéro, parceque le métal communique avec les corps environnans, l'état du zinc sera 1; et comme la même différence doit exister entre le zinc et le plateau collecteur, l'état de celui-ci sera encore zéro; d'où il résulte que l'appareil n'aura subi aucun changement.

649. Supposons maintenant que l'on place un papier imbibé d'eau entre le zinc et le plateau collecteur; celui-ci se chargera d'électricité vitrée. Car, pour que les deux cas d'équilibre aient lieu, il faut que l'état de l'extrémité cuivre, que l'on tient entre les doigts, soit toujours zéro, que l'état du

zinc soit toujours 1, et que celui du plateau collecteur, que l'on suppose avoir les mêmes dimensions que le morceau de zinc, soit de même représenté par l'unité, et il est d'ailleurs évident que l'électricité de ce plateau doit être vitrée comme celle du zinc.

650. La manière dont Volta conçoit la production d'électricité qui a lieu au contact des deux métaux, est un peu différente de celle que nous venons de présenter. Ce célèbre physicien paraît admettre une impulsion qui agit pour chasser dans le zinc une partie du fluide électrique que possédait le cuivre, et de là vient que le premier se trouve électrisé positivement, et l'autre négativement. Dans l'expérience (648) où l'on met en contact immédiat avec le plateau collecteur du condensateur, une pièce de zinc adhérente à une pièce de cuivre que l'on tient à la main, le plateau collecteur reste dans son état naturel, parceque le zinc est en contact des deux côtés avec cuivre et cuivre ; d'où il suit que l'on a deux forces égales qui, agissant en sens contraire, se détruisent mutuellement (1). Nous avons préféré d'en user ici comme par rapport à l'électricité produite par le frottement ou par la chaleur, c'est-à-dire, de nous borner au simple énoncé des faits, sans entrer dans la considération de la force motrice, qui ne semble pas être encore bien connue.

Pile de Volta.

651. Nous sommes maintenant en état d'expliquer les effets de l'appareil que l'on a nommé *la pile de Volta*, et, dans cette explication, nous prendrons pour guide l'ouvrage le plus méthodique et le plus lumineux qui ait paru sur cette matière; savoir, le Rapport fait à la Classe des Sciences Mathématiques et Physiques de l'Institut National, par Biot, au nom d'une commission composée de douze membres pris dans cette même Classe. La pile dont il s'agit est formée de disques de deux

(1) Journal de Physique; vendémiaire an x, p. 212.

métaux différens, par exemple, de cuivre et de zinc, réunis par paires base à base, avec des disques de carton ou de drap mouillé, interposés un à un entre chaque paire et la suivante, ainsi que le représente la *figure* 69, où la lettre *c* indique les disques de cuivre, la lettre *z* les disques de zinc, et la lettre *h* les conducteurs humides. Chaque paire de disques est regardée comme formant un des élémens de la pile.

Etat Electrique de la Pile isolée.

652. Pour procéder avec plus de simplicité, considérons d'abord la pile comme isolée, et supposons que l'on ait commencé à la construire, en plaçant seulement la première paire *c* 1, *z* 2 sur l'isoloir, le cuivre étant en dessous. Il est clair, d'après ce qui a été dit, que l'état du cuivre sera $-\frac{1}{2}$, et celui du zinc $+\frac{1}{2}$. Plaçons maintenant au-dessus du disque *z* 2 un conducteur humide *h*, et au-dessus de ce dernier un disque de cuivre *c* 3. Pour que la condition de l'équilibre à distance fût remplie, il suffirait que le zinc *z* 2 cédât au cuivre *c* 3 la moitié de son fluide, et alors l'état du cuivre *c* 1 étant toujours $-\frac{1}{2}$, celui du zinc *z* 2 serait $\frac{1}{4}$, et celui du cuivre *c* 3 serait aussi $\frac{1}{4}$. Mais alors la différence entre les deux premiers disques serait seulement $\frac{3}{4}$, au lieu qu'elle doit être égale à l'unité. Il s'établira donc entre les trois corps une nouvelle distribution de fluide; en vertu de laquelle l'état du cuivre *c* 1 deviendra $-\frac{2}{3}$; celui du zinc *z* 2 sera $-\frac{2}{3}+1$, ou $+\frac{1}{3}$, et celui du cuivre *c* 3 sera de même $+\frac{1}{3}$; ce qui satisfait aux deux conditions d'équilibre.

Si nous ajoutons un quatrième disque *z* 4, il faudra qu'il ait une unité de plus que le cuivre *c* 3, ce qui exigera un nouveau changement dans les quantités relatives de fluide des disques inférieurs, ensorte que l'on aura -1 pour le cuivre *c* 1, 0 pour le zinc *z* 2, 0 pour le cuivre *c* 3, et 1 pour le zinc *z* 4.

En poursuivant le même raisonnement, il sera facile de trouver les états électriques des différentes parties de la pile, quel que soit le nombre des disques qui la composent. Les quantités d'électricité

d'électricité vitrée et celles d'électricité résineuse formeront deux progressions arithmétiques, dans chacune desquelles la différence entre deux termes consécutifs sera l'unité.

653. Si l'on suppose que le nombre des disques soit pair, on aura l'état du premier c 1, en divisant ce nombre par 4, et en donnant au résultat le signe négatif. Ainsi, dans la pile que représente la figure, et qui est composée de 12 disques, l'état du premier est $-\frac{12}{4}$ ou -3; ce qui donne successivement pour les différentes paires $-3-2$, $-2-1$, $-1+0$, $+0+1$, $+1+2$, $+2+3$. Dans ce cas, la somme des deux progressions sera toujours zéro; le disque inférieur qui est de cuivre, et le disque supérieur qui est de zinc, seront dans deux états égaux et opposés d'électricité; et il en sera de même pour deux disques quelconques pris à égale distance des extrémités. De plus, l'action deviendra nulle, avant le passage de l'électricité résineuse à l'électricité vitrée, ensorte qu'il y aura deux disques dans l'état naturel, qui seront situés au milieu de la pile.

Si le nombre des disques est impair, on trouvera l'état du premier c 1, en prenant d'abord le quart de ce nombre avec le signe négatif, et en ajoutant au résultat l'unité divisée par quatre fois le même nombre. Supposons que le nombre des disques soit de 7, l'état du premier sera $-\frac{7}{4}+\frac{1}{28}$ ou $-\frac{12}{7}$. Ainsi, on aura successivement pour les différens disques, $-\frac{12}{7}$, $-\frac{5}{7}$, $-\frac{5}{7}$, $+\frac{2}{7}$, $+\frac{2}{7}$, $+\frac{9}{7}$, $+\frac{9}{7}$. Dans tous les cas de ce genre, la somme totale est aussi zéro.

Passage de l'état d'Isolement à celui de Communication avec le sol.

654. Supposons maintenant que l'on mette le dernier disque z 12 en contact avec un corps conducteur isolé qui soit dans l'état naturel, et que nous désignerons par A; le disque z 12 lui communiquera une partie de son fluide, ce qui ne pourra se faire sans que le disque c 11 ne cède lui-même au disque

z 12 une partie du sien, et ainsi de suite, de manière que les disques z 6, c 7, qui étaient à zéro, passeront à l'état négatif, et que les états de ceux qui sont en dessous deviendront encore plus négatifs.

655. Rendons ceci sensible par un exemple. Nous venons de voir que le progrès de l'électricité dans la pile réduite à ses élémens, est représenté par la série $-3-2$, $-2-1$, $-1+0$, $+0+1$, $+1+2$, $+2+3$. Concevons que le corps A, que l'on met en contact avec le disque z 12, ait une capacité électrique six fois aussi grande que celle du même disque, c'est-à-dire, qu'à raison d'une surface plus étendue et des autres circonstances, il lui faille six fois autant de fluide qu'au disque z 12, pour que la tension ou la densité électrique étant la même de part et d'autre, il y ait équilibre entre les deux corps. La nouvelle distribution qui s'établira dans la pile, par l'intervention du corps A, sera représentée par la série suivante, $-4-3$, $-3-2$, $-2-1$, $-1+0$, $+0+1$, $+1+2$, 12; dans laquelle le dernier terme 12 exprime l'état du corps A. De cette manière, les quantités de fluide du disque z 12 et du corps A satisfont à la condition de l'équilibre, qui exige qu'elles soient dans le rapport des capacités électriques (1). De plus, la différence d'état entre chaque disque et le suivant continue d'être égale à l'unité. Enfin la somme $+16$ des termes positifs, y compris le corps A qui, à cet égard, est censé ne faire plus qu'un avec le disque z 12, est la même, au signe près, que la somme -16 des termes négatifs, conformément à la loi que nous avons exposée (653).

Il résulte de cette même distribution, que le point zéro ne répond plus au milieu de la série, mais se trouve relevé de

---

(1) Soit x la quantité de fluide que doit avoir le disque z 12 dans le cas de l'équilibre, n le nombre des paires de disques dont la pile est composée, et q la capacité du corps A, lorsque celle du dernier disque est l'unité; on aura, en général, $x = \frac{n^2}{2n+q}$.

deux rangs au-dessus de sa première position. C'est une suite de ce qu'une partie de la somme + 16 des termes positifs étant fournie par le corps A surajouté à la pile, le nombre de ceux qui appartiennent exclusivement à cette pile doit être plus petit que celui des termes négatifs dont la somme est — 16.

656. Si telle est la capacité du corps A, que la quantité de fluide du disque z 12 ne puisse être un nombre entier, il n'y aura point de zéro, mais seulement des termes positifs et des termes négatifs. Ainsi, en supposant que la capacité de A soit seulement quadruple de celle de z 12, on aura cette série, $-\frac{15}{4}-\frac{11}{4}$, $-\frac{11}{4}-\frac{7}{4}$, $-\frac{7}{4}-\frac{3}{4}$, $-\frac{3}{4}+\frac{1}{4}$, $+\frac{1}{4}+\frac{5}{4}$, $+\frac{5}{4}+\frac{9}{4}$, 9; dans laquelle la somme des termes positifs est $+\frac{57}{4}$, et celle des termes négatifs $-\frac{57}{4}$. Dans le cas présent, le point zéro est censé se trouver entre la cinquième et la sixième fraction, en descendant (1).

657. On voit par ce qui précède, qu'à mesure que la capacité du corps A augmente, la position soit réelle, soit virtuelle, du zéro, s'élève de plus en plus; en même temps la tension électrique du dernier disque va en diminuant. Donc, si l'on suppose que la capacité du corps A soit infinie, le zéro correspondra à l'extrémité supérieure de la pile, c'est-à-dire, que la tension électrique du dernier disque étant infiniment petite ou nulle, ce disque sera dans l'état naturel, tandis que le reste de la pile se trouvera dans l'état résineux. Ce cas est celui d'une pile isolée par le bas, et dont le disque supérieur communique avec le réservoir commun, qui est censé avoir une capacité immense, par rapport à celle du même disque.

658. Concevons, au contraire, que le corps A soit mis en contact avec l'extrémité inférieure de la pile; on aura des effets opposés aux précédens, c'est-à-dire, que le premier disque *c* 1 cédera au corps A une portion de son fluide résí-

(1) En appliquant ici la formule précédente, on a $n=6$, et $q=4$, ce qui donne $x=\frac{36}{12+4}=\frac{9}{4}$, après quoi il est facile de trouver tout le reste.

neux, et qu'une émission semblable aura lieu d'un disque à l'autre en descendant, desorte que les disques $z6$, $c7$ qui étaient à zéro, passeront à l'état positif, et que l'état de chacun des disques situés au-dessus deviendra encore plus positif. Si nous supposons de nouveau que le corps A ait une capacité électrique six fois aussi forte que celle du disque $c1$, on aura cette série $-12, -2-1, -1+0, +0+1, +1+2, +2+3, +3+4$; dans laquelle le premier terme représente l'état du corps A, qui est le même, ainsi que celui de tous les termes de la pile, que dans notre premier exemple, excepté que l'ordre est renversé et que les signes sont changés.

659. Si la capacité du corps A devient plus considérable, la position du point zéro s'abaissera davantage, et par une suite nécessaire la tension du premier disque s'affaiblira ; et si la capacité du corps A est censée être infinie, le zéro répondra à l'extrémité inférieure de la pile, dont tous les disques qui suivent le premier seront à l'état vitré. C'est le cas d'nne pile isolée par le haut, et en communication par le bas avec le réservoir commun.

La distribution du fluide vitré, dans ce dernier cas, étant toujours soumise aux conditions que la différence entre les états des disques d'une même paire soit l'unité, et qu'il y ait égalité entre deux disques situés de part et d'autre de chaque conducteur hnmide, il est aisé de voir que les états des différens disques de la pile seront successivement $01, 12, 23, 34, 45$, etc. De là il suit que les états relatifs à chaque espèce de métal formeront une progression arithmétique croissante, dont le premier terme sera zéro pour le cuivre, et l'unité pour le zinc, et dans laquelle la différence entre deux termes consécutifs sera aussi l'unité. Le même raisonnement s'applique au cas où la pile est en communication par le haut avec le réservoir commun. Seulement les signes des termes de la progression sont alors négatifs.

660. Dans l'un et l'autre cas, la somme des termes des deux progressions réunies sera exprimée par le carré du nombre des disques d'une même espèce, en supposant toujours que le

nombre total des disques soit pair. Ainsi, dans la pile représentée par la figure, et qui renferme six disques de chaque espèce de métal, la somme des termes, ou, ce qui revient au même, la charge de la pile a pour expression 36. Il en résulte que, toutes choses égales d'ailleurs, les phénomènes qui dépendent de la quantité d'électricité accumulée dans la pile, croissent plus rapidement que ceux qui dépendent de la quantité répandue sur le disque supérieur. Par exemple, si l'on ajoute deux disques aux douze qui composent la pile que nous considérons ici, la charge sera représentée par 49, dont la différence avec la précédente est 13, tandis que l'état du disque supérieur sera exprimé par 7, dont la différence avec celui de la pile précédente est simplement égale à l'unité.

La loi que nous venons d'exposer, relativement aux divers états des disques qui se succèdent dans la pile, est la plus simple que l'on puisse imaginer; mais il est très-probable que des expériences plus précises que celles qui ont été faites jusqu'ici pour la reconnaître, y apporteront des modifications. On peut même présumer qu'il existe ici d'autres actions dont l'influence, quoique beaucoup plus faible que celle des métaux, méritera d'etre appréciée, lorsque l'on voudra parvenir à une détermination rigoureuse, qui exigera toutes les ressources de la physique la plus adroite, réunies à celles de la plus savante analyse.

661. Pour mieux saisir encore la différence qui existe entre la pile isolée et celle qui ne l'est pas, comparons-les l'une avec l'autre, relativement à leurs effets, pour charger le condensateur. Si l'on met la pièce supérieure d'une pile isolée en contact avec le plateau collecteur de cet instrument, celui-ci enlevera une partie de l'électricité de la pile, de manière que les quantités de fluide des différens disques subiront une variation, jusqu'à ce que l'équilibre soit rétabli. Mais la charge du condensateur sera limitée d'après la circonstance même de l'isolement, qui réduit la pile à n'avoir que sa quantité naturelle de fluide, sans rien pouvoir dérober aux corps environnans. Supposons, au contraire, que la pile communique avec

le sol par sa base. A mesure qu'elle cédera de son fluide au plateau collecteur, elle réparera ses pertes aux dépens du réservoir commun; ensorte que la tension de sa pièce supérieure restera la même, et que le condensateur se chargera graduellement d'une quantité de fluide proportionnelle à sa capacité et à sa force condensante. On voit par là que, dans ce dernier cas, la charge du condensateur, toutes choses égales d'ailleurs, sera sensiblement plus forte que si la pile était isolée.

662. Tous les résultats qui viennent d'être exposés tendent à prouver que les accroissemens de densité électrique qui ont lieu successivement dans les différens disques, en allant de la base au sommet dans une pile non isolée, et du milieu vers les extrémités dans une pile isolée, dépendent de l'interposition des conducteurs humides. Concevons une pile non isolée, uniquement composée d'élémens métalliques placés immédiatement les uns au-dessus des autres. L'effet du premier élément se répétera de la base au sommet, sans aucun accroissement; ensorte que si la pile commence à l'ordinaire par un disque de cuivre, les états électriques de ses différens élémens seront représentés par cette suite, $0+1$, $0+1$, $0+1$, etc. Si, au contraire, la pile est isolée, la série deviendra, $-\frac{1}{2}+\frac{1}{2}$, $-\frac{1}{2}+\frac{1}{2}$, $-\frac{1}{2}+\frac{1}{2}$, etc. Ainsi, on ne gagnerait rien, dans l'une ou l'autre hypothèse, à augmenter le nombre des élémens ou la hauteur de la pile (1).

663. Quelques physiciens avaient adopté une manière de construire la pile, différente de celle que nous avons décrite. Dans cette dernière, les disques et les conducteurs humides sont disposés comme il suit, en allant de bas en haut : cuivre, zinc, humide; cuivre, zinc, humide, etc., et la pile se termine par deux disques qui sont encore cuivre et zinc. L'autre construction était disposée dans l'ordre suivant : zinc, humide, cuivre; zinc, humide, cuivre, etc., et au-dessus du dernier conducteur humide, on plaçait un seul disque, qui était de

(1) De l'Electricité dite Galvanique, par Volta. Annales de Chimie, 30 frimaire an x, p. 250.

cuivre. Ces deux manières de former la pile ont donné lieu à diverses discussions entre les physiciens, dont les uns soutenaient que le véritable élément de la pile était une paire de disques; savoir, cuivre et zinc, suivie d'un conducteur humide, tandis que, selon l'opinion des autres, l'assortiment qui donnait l'élément de la pile était zinc, humide et cuivre. La question est facile à résoudre, d'après les principes que nous avons exposés. Dans la seconde manière de disposer la pile, le disque de zinc, qui sert de base, est censé faire partie du réservoir commun, et la véritable pile commence au premier disque de cuivre qui est en contact avec un disque de zinc. D'une autre part, le disque de cuivre, qui occupe seul le haut de la pile, ne fait autre chose que partager, par l'entremise du corps humide qui le précède, le fluide du zinc qui est en contact avec ce dernier corps. De là vient que si l'on met un fil métallique en communication avec le zinc qui commence la pile, et un autre en communication avec le cuivre qui la termine, le premier fil sera électrisé résineusement, et le second vitreusement, ensorte que cette pile paraîtra produire des effets inverses de ceux qui ont lieu avec la première; mais tout se conciliera, si l'on distingue les points par lesquels se font les contacts des deux fils, de ceux qui donnent les véritables limites de la pile.

Comparaison de la Pile avec la Tourmaline.

664. Parmi les différens corps qui ont servi à faire des expériences électriques, avant la découverte du galvanisme, la tourmaline (617) paraît être celui qui ait le plus d'analogie avec une pile isolée, au moins quant à la distribution des deux électricités. Dans la tourmaline, ainsi que dans la pile, les actions de ces électricités diminuent graduellement depuis les extrémités jusqu'à un certain terme, où elles se réduisent à zéro. De plus, il est facile de concevoir que si l'on divisait une pile en plusieurs portions composées chacune d'un certain nombre d'élémens, et que l'on isolât ces différentes portions,

elles deviendraient à l'instant des piles complètes, dont les moitiés seraient sollicitées par des électricités contraires, comme cela a lieu dans les fragmens détachés d'une tourmaline. Cependant, à en juger d'après l'état actuel de nos connaissances, il existe plusieurs différences remarquables entre les deux corps. Dans l'électrisation de la pile, chaque fluide se transmet d'un disque à l'autre, par l'intermède d'un conducteur humide; au contraire, lorsque la tourmaline s'électrise, chaque fluide reste, après son dégagement, dans la molécule où il était auparavant à l'état de combinaison (623). De plus, les densités électriques de la pile décroissent lentement depuis les extrémités jusqu'au milieu, où elles deviennent nulles, tandis que, dans la tourmaline, elles diminuent rapidement, ensorte que les points où elles se réduisent à zéro sont plus ou moins rapprochés des extrémités. Malgré ces diversités, une commission, composée de plusieurs membres de l'Institut national, a jugé que la comparaison des minéraux électriques par la chaleur, avec la pile de Volta, méritait de fixer l'attention des physiciens (1).

Appareil à Couronnes de Tasses.

665. On substitue quelquefois à la pile l'appareil que l'on nomme à *couronnes de tasses ;* il est composé d'une suite de verres remplis d'eau jusqu'à une certaine hauteur, entre lesquels la communication est établie par des arcs métalliques, qui ont une plaque de zinc soudée avec l'une de leurs extrémités, et une plaque de cuivre soudée avec l'extrémité opposée. On dispose chacun de ces conducteurs de manière que le cuivre soit plongé dans l'eau que renferme un des verres, et le zinc dans celle que contient le suivant; de plus, il y a toujours dans un même verre une plaque de cuivre et une de zinc, qui appartiennent à deux conducteurs différens, et qui

(1) *Voyez* le rapport fait à la Classe des Sciences Mathématiques et Physiques de l'Institut national, sur le prix fondé par l'Empereur, p. 5.

laissent entre elles un certain intervalle. Il en résulte que la succession des métaux et des conducteurs humides est la même que dans la pile.

666. On voit, par ce qui précède, que la théorie du célèbre physicien de Pavie repose toute entière sur le phénomène inconnu jusqu'alors, d'une électricité produite, non plus par le frottement, par la communication ou par la chaleur, mais par le simple contact de deux métaux. Si l'on pouvait trouver chez les anciens, relativement à cet objet, quelqu'une de ces premières lueurs qui précèdent quelquefois de loin les découvertes brillantes, mais qui ne font que passer, ce serait dans le peu que Newton a écrit sur l'électricité, qui alors était à peine naissante. Ce savant illustre, après avoir remarqué que les attractions produites par la gravité et par les vertus magnétique et électrique, s'étendent à des distances très-sensibles, ensorte qu'elles ont été reconnues même par les hommes ordinaires, ajoute qu'il pourrait bien exister encore des attractions resserrées dans un espace si étroit, qu'elles eussent échappé jusqu'alors à toutes les observations, et que peut-être l'attraction électrique en particulier s'exerce-t-elle à des intervalles extrêmement petits, sans avoir besoin d'être excitée par le frottement (1).

Diverses Expériences faites avec la Pile.

667. L'action électrique qui avait lieu au contact mutuel des métaux, dans les expériences sur la grenouille, était très-faible en elle-même, et ce qui contribuait surtout à en rendre les effets sensibles, c'était la grande irritabilité des organes qui en étaient le sujet. Cette même action, transportée dans la pile, où elle s'agrandit en se multipliant, est devenue capable de produire, par sa seule énergie, une multitude de phénomènes analogues à ceux de l'électricité ordinaire, aveo

(1) *Optice Lucis, edit. Lausannæ et Genevæ, Lib. III, Quæst. XXXI,* p. 304.

les différences que doit naturellement amener celle qui existe entre les mouvemens du fluide dans les appareils employés de part et d'autre.

Commotion.

668. Reprenons le cas où la pile communique avec le sol. Si l'on touche d'une main le sommet de cette pile et de l'autre sa base, on éprouve une commotion continue qui agace, pour ainsi dire, les organes, et tantôt se fait sentir seulement dans la main, tantôt s'étend jusqu'au conde, selon le degré de tension de la pile. Dans ce cas, la pile se décharge, par le haut, des excès de fluide de ses différens disques, en même temps qu'elle répare ses pertes, à l'aide dn fluide qu'elle reprend par sa base, et il en résulte un courant électrique non interrompu, qui se partage entre les organes et le sol, et qui occasionne, à l'égard des premiers, la sensation que produit cette expérience.

669. Supposons maintenant la pile isolée : sa moitié inférieure étant alors à l'état négatif ou à l'état d'électricité résineuse, tendra d'abord à reprendre subitement, aux dépens des organes, la quantité de fluide vitré nécessaire pour la faire repasser au même état que quand elle n'était pas isolée, c'est-à-dire, à celui où elle était chargée uniquement par des quantités de fluide vitré qui croissaient depuis la base jusqu'au sommet. Ensuite la circulation s'établira à travers les organes, comme dans le cas d'une pile non isolée. Or, les organes étant des conducteurs imparfaits, il en résulte que quand la pile est isolée, la colonne se recharge en général moins rapidement que lorsqu'elle répare ses pertes aux dépens du sol, avec lequel elle est en communication, et à cet égard l'effet de la commotion doit être moins sensible. Mais il paraît que cette diminution est plns que compensée par le mouvement plus rapide du fluide dans le premier instant, et par l'action plus concentrée de la décharge, dont l'effet ne se partage plus entre les organes et le sol. Cette explication s'accorde avec les

expériences du célèbre Van-Marum, qui a obtenu généralement d'une colonne isolée des effets plus sensibles, que d'une colonne non isolée, et a remarqué que dans le premier cas, les commotions en particulier étaient très-fortes (1).

670. Si l'on a pris la précaution de mouiller ses mains avant de toucher la pile par ses parties supérieure et inférieure, la commotion deviendra beaucoup plus sensible. Dans ce cas, le liquide, dont la faculté conductrice est plus grande que celle des organes, favorise la transmission de l'électricité à travers ces derniers. On augmentera encore l'énergie de la commotion, en se servant, pour toucher la pile, de deux tubes de métal que l'on tient dans les mains mouillées. Si l'on forme une chaîne de plusieurs personnes, dont les deux qui sont aux extrémités touchent, l'une la partie supérieure et l'autre la base de la pile; et si, de plus, toutes les mains sont mouillées, la commotion deviendra générale, pourvu que le nombre des personnes ne passe pas une certaine limite qui dépend de la charge de la pile (2).

671. Nous avons supposé jusqu'ici que les corps mouillés interposés dans la pile, étaient imbibés d'eau pure. Mais si l'on emploie une dissolution saline faite, par exemple, avec le muriate de soude, ou mieux encore avec le muriate d'ammoniaque, la commotion devient incomparablement plus forte. Volta a conclu de cette observation, que les dissolutions salines favorisaient l'action de la pile, principalement en ce qu'elles augmentaient la faculté conductrice de l'eau dont le carton ou le drap était imbibé.

Les effets dont nous avons parlé ont également lieu avec l'appareil à tasses. Il suffit alors, pour éprouver la commotion, de plonger une main dans l'eau que contient le verre placé à l'une des extrémités de la série, et l'autre dans celle que renferme le verre situé à l'extrémité opposée.

---

(1) Annales de Chimie; 30 frimaire an x, pp. 305 et 306.

(2) Histoire du Galvanisme, t. II, p. 8.

Charge de la Bouteille de Leyde.

672. Si l'on met le crochet d'une bouteille de Leyde en contact avec le haut de la pile, tandis que sa surface extérieure communique avec les corps environnans, cette bouteille se chargera de manière que sa tension sera à-peu-près égale à celle de la pile.

Attraction.

673. Supposons que l'on attache au sommet de la pile un fil métallique délié, et un second à la base, de manière que les extrémités de ces fils se regardent, et soient à une petite distance l'une de l'autre. Si les fils ont en même temps une mobilité suffisante, leurs électricités contraires les détermineront à s'approcher l'un de l'autre jusqu'au contact, et si l'on dérange alors un des fils de sa position, l'autre le suivra, en conservant avec lui son adhérence.

On voit par ce qui précède, qu'il y a cette différence entre les effets qui ont lieu avec les machines ordinaires, et ceux qui sont produits par la pile, que les premiers sont anéantis par un seul contact, au lieu que les autres se perpétuent pendant tout le temps du contact. La pile une fois montée, devient ainsi comme un réservoir d'électricité, qui, sans le secours et comme à l'insçu du physicien, se remplit spontanément, qui regagne continuellement ce qu'on lui enlève, et qui serait inépuisable si les corps humides, dont la pile est composée en partie, étaient à l'abri du desséchement.

Combustion.

674. Nous avons vu (495) que la décharge d'une batterie déterminait la combustion d'un fil métallique à travers lequel on la faisait passer. On obtient beaucoup plus facilement

un effet analogue, en se servant de la pile. Il suffit alors de toucher à-la-fois les deux extrémités de cette pile avec un fil de fer : on voit naître une étincelle à l'endroit du contact, et si la pile est fortement chargée, le fil devient incandescent, et brûle sur une longueur plus ou moins considérable.

Influence du nombre et de la grandeur des Disques.

675. Tout ce qui précède nous conduit à comparer les effets de différentes piles que l'on suppose varier entre elles par le nombre et par l'étendue des disques. Nous adopterons ici les résultats auxquels Van-Marum est parvenu, dans des expériences faites avec la sagacité et l'exactitude que tout le monde lui connaît (1). Nous avons vu (652) qu'à mesure qu'on augmente le nombre des disques dont la colonne est composée, elle agit, toutes choses égales d'ailleurs, avec plus d'énergie, à raison d'un plus haut degré de tension. Mais si l'on suppose deux colonnes formées d'un nombre égal de disques, dont les diamètres diffèrent sensiblement de l'une à l'autre, qu'arrivera-t-il, si l'on soumet ces colonnes aux mêmes expériences? D'après les observations de Van-Marum, les tensions seront égales des deux côtés ; il n'y aura pas de différence sensible dans la force des commotions; mais la colonne, dont les disques seront plus grands, aura beaucoup plus d'efficacité que l'autre pour brûler un fil de métal.

676. L'égalité de tension n'est pas difficile à concevoir. On peut considérer ici une pile à larges disques, comme un assemblage de piles à disques étroits, placées les unes à côté des autres, et dont chacune aurait une tension égale à celle d'une seule pile séparée; il en résulte seulement que la quantité totale de fluide sera plus grande dans la pile à larges disques que dans l'autre ; mais la tension, qui dépend de la densité (533),

(1) Annales de Chimie; 30 frimaire an x, p. 289 et suiv.

ou de la quantité de fluide accumulée dans chaque point, sera la même des deux côtés.

677. Maintenant, pour concevoir comment les commotions produites par les deux piles ne diffèrent pas sensiblement entre elles, on doit faire attention que la commotion n'est pas ici un effet instantané, comme dans l'expérience de Leyde; elle est le résultat d'une multitude de petites secousses qui se succèdent, à la vérité, avec une rapidité inconcevable, mais cependant se succèdent. Il faut considérer de plus, que le rétablissement des différens disques dans leur état primitif, à mesure que l'on décharge la pile, ne se fait aussi que par degrés, et c'est pour cela que quand on se sert de conducteurs métalliques d'une grande étendue, la pile emploie un certain temps ponr revenir au même degré de tension. Or, d'une part, l'effet initial qui a lieu au commencement de la décharge est plus grand avec la pile à larges disques, où la masse de fluide est plus considérable; mais, d'une autre part, dans les instans suivans, le retour à l'état primitif ne s'opère pas aussi rapidement dans cette pile que dans celle dont les disques sont d'un plus petit diamètre, parcequ'il faut plus de temps au fluide pour se répandre sur de plus grandes surfaces, et y parvenir à la même densité. Il paraît donc qu'il s'établit une sorte de compensation entre l'effet de la plus grande masse qui agit dans le premier instant et celui de la moindre vîtesse qui a lieu dans les instans suivans, ensorte que l'effet total ne surpasse pas sensiblement celui qui est produit par une pile à petits disques, où, en général, la vîtesse du fluide est plus accélérée, mais où sa masse est d'ailleurs moins considérable.

678. Reste à considérer la plus grande facilité de la combustion, lorsqu'on emploie une pile à larges disques. Or, ici le fluide agit de même beaucoup plus sensiblement par sa masse dans le premier instant, ce qui lui donne d'autant plus d'avantage pour déterminer le commencement de la combustion, que le fil métallique peut être comparé à un canal délié qui se présente pour recevoir un effluve abondant et rapide. Mais dès qu'une fois la combustion a pris naissance, elle s'entretient par

la chaleur du fil de fer, jointe à l'action des nouvelles quantités de fluide qui arrivent.

679. Van-Marum dirigea ses expériences vers une comparaison non moins intéressante, entre la charge de la pile et celle d'une batterie de 25 verres, dont les garnitures formaient ensemble une surface de 137 ½ pieds carrés. Il observa d'abord qu'une pile de 220 paires métalliques d'argent et de zinc, à l'aide d'un seul contact aussi court que possible, chargeait la batterie à un degré qui égalait celui de sa propre tension, ensorte que la pile et la batterie produisaient le même effet sur l'électromètre. Cependant les commotions produites par la batterie n'avaient pas la même force que celles qu'on éprouvait en se servant de la pile : c'était une suite de ce que la décharge de la batterie était bornée à l'action du fluide qui s'y trouvait répandu à l'instant de la commotion, au lieu que pendant cet instant nécessairement composé, quelque court qu'il fût, la pile avait déjà commencé à se recharger.

Les effets de la pile furent ensuite comparés avec ceux d'une machine électrique, dont le plateau avait 31 pouces de diamètre. Il s'agissait de savoir combien de contacts du conducteur de cette machine seraient nécessaires pour charger une batterie au même degré de tension que celui qui serait produit par un seul contact de la pile. Mais pour que les résultats fussent comparables, il fallait faire ensorte que la batterie ne reçût, pendant son contact avec le conducteur, que la quantité d'électricité que celui-ci pouvait fournir par un mouvement du plateau d'une durée égale à celle de ce contact. Pour parvenir à ce but, Van-Marum appliquait d'abord un doigt sur le conducteur, tandis que le plateau était en jeu, et laissait ensuite un intervalle à peine sensible entre l'instant de retirer le doigt, et celui de mettre en contact avec le conducteur un fil métallique, qu'il lui présentait de l'autre main, par l'intermède d'un corps isolant, et qui communiquait avec le fond de la batterie. De cette manière, la charge de la batterie se réduisait au fluide que le plateau développait pendant le moment du contact. L'expérience fit voir qu'il fallait six de ces contacts pour

charger la batterie au même degré de tension que celui qui résultait d'un seul contact de la colonne (1).

On ne peut lire ces résultats sans être étonné de l'immense quantité de fluide électrique qui s'accumule, pendant un temps très-court, dans la pile de Volta, et de l'extrême vîtesse avec laquelle le même fluide est mu dans cet instrument, déjà si propre à exciter la surprise, en ce qu'il n'a besoin que de lui-même pour acquérir sa puissance.

Des différentes Substances qui peuvent être employées pour former la Pile.

680. Nous avons considéré la pile jusqu'ici comme étant composée de trois substances qui concourent le plus ordinairement à sa formation. Mais les tentatives que l'on a faites pour varier la combinaison de ses élémens, ont conduit à des résultats intéressans relativement à l'influence qu'exercent, les uns sur les autres, les différens corps que l'on peut employer.

681. Deux métaux quelconques, mis en contact, se constituent, comme nous l'avons dit (645), dans deux états différens et opposés d'électricité. Mais Volta a découvert que ces états, comparés entre eux dans divers métaux, présentent une gradation très-remarquable. Si l'on forme l'échelle suivante, argent, cuivre, fer, étain, plomb, zinc, l'état de chacun de ces métaux différera en plus de celui du métal précédent que l'on suppose en contact avec lui, et en moins de celui du métal suivant. Or, telle est la loi à laquelle est soumise cette gradation, que la différence d'état entre le premier et le dernier métal est égale à la somme de toutes les différences, en allant d'un métal à l'autre (2).

Pour fixer nos idées, représentons par 1 la différence d'état entre l'argent et le cuivre, dans le cas du contact, par 2 celle

(1) Annales de Chimie; frimaire an x, p. 297 et suiv.

(2) *Ibid.*, p. 251.

entre

entre le cuivre et le fer, par 3 celle entre le fer et l'étain, par 1 celle entre l'étain et le plomb, et par 5 celle entre le plomb et le zinc ; si nous supposons une petite pile formée de ces six métaux ainsi rangés, et qui soit en communication avec le sol, l'état de l'argent étant zéro, celui du cuivre sera 1, celui du fer 3, celui de l'étain 6, celui du plomb 7, et celui du zinc 12. La différence d'état entre les deux extrêmes, argent et zinc, sera donc 12 moins zéro, ou simplement 12, quantité qui est égale à la somme des différences 1, 2, 3, 1, 5 entre les états consécutifs des six métaux.

Il suit de là qu'une pile de telle hauteur qu'on voudra, dont chaque élément offrirait cette série de métaux, ne produira pas plus d'effet que si elle n'était composée que des deux métaux extrêmes réunis par paires. Mais le résultat qui a conduit Volta à cette conséquence, mériterait d'être vérifié par des expériences exactes.

682. Nous avons supposé que les corps imbibés d'eau qui entrent dans la construction de la pile, n'y faisaient que l'office de conducteurs. Il est néanmoins probable qu'ils influent même sur la production de l'électricité. Mais il paraît que cette action est très-faible, en comparaison de celle que les métaux exercent entre eux. On a essayé de diversifier la construction de la pile, par la variété des substances dont on la composait. Volta a reconnu que l'on pouvait employer, au lieu des métaux ordinaires, la pyrite et le charbon de bois (1). Gautherot a obtenu des effets sensibles, en substituant cette dernière substance au cuivre, et le même physicien a construit des piles, dans lesquelles un des agens était encore le charbon de bois, et l'autre le schiste connu sous le nom de *crayon des charpentiers* (2). M. Davy a combiné, avec succès, les actions du charbon, de l'acide nitrique et de l'eau, et M. Pfaff celles d'un métal, de l'eau et d'un sulfure, etc. (3).

(1) Annales de Chimie; 30 frimaire an x, p. 252.

(2) Histoire du Galvanisme, t. II, p. 208.

(3) Bulletin des Sciences de la Société Philom.; nivôse an x, p. 77.

683. D'après ces observations et d'autres du même genre, il paraît exister entre les corps humides et les corps solides une corrélation, qui tend à faire varier, suivant les circonstances, les fonctions de ces corps; ensorte qu'une substance humide qui, dans telle combinaison, faisait la fonction de conducteur, exerçant dans une autre combinaison une action très-marquée sur un des corps solides en contact avec elle, s'associe à ce corps pour produire la vertu électrique, et réduit l'autre corps, dont l'action est beaucoup plus faible, à n'être plus qu'un simple moyen de communication, relativement à l'électricité.

Les combinaisons dans lesquelles il n'entrerait que des substances solides, ou des substances humides, n'ont pas encore été offertes par l'expérience. Mais Volta soupçonne, ainsi que nous le dirons dans la suite, que la seconde est réalisée par la nature dans le règne animal.

684. Dans les piles ordinaires, les métaux subissent une prompte oxidation, dont l'inconvénient n'est racheté par aucune influence sensible pour favoriser le développement de l'électricité, comme nous le ferons voir dans la suite. De plus, les rondelles de drap mouillé que l'on interpose entre les élémens de la pile, se dessèchent en peu de temps, ce qui fait perdre à l'appareil son efficacité. De toutes les tentatives qui ont été faites pour parer à ces inconvéniens, aucunes n'ont eu plus de succès que celles d'Alliseau, jeune physicien recommandable par son zèle. Il a construit une pile dont les élémens sont séparés par des cercles de porcelaine remplis de cristaux de sel marin humecté d'eau. Cette pile ayant été soumise à des expériences comparatives avec une pile ordinaire, on a observé qu'au bout de 53 jours ses effets se soutenaient à-peu-près au même degré que quand elle était nouvellement montée, tandis que ceux de la pile ordinaire étaient anéantis au bout du troisième jour. Il fallait seulement avoir soin de réparer de temps en temps les pertes occasionnées par l'évaporation. La pile ayant été démontée, on trouva que les disques métalliques n'étaient que légérement oxidés, ce qui offre un nouvel avan-

tage joint à celui d'une permanence d'effets qui peut être très-utile dans certaines expériences (1).

Des Piles secondaires.

685. Le caractère distinctif des différentes piles dont nous avons parlé jusqu'ici, consiste en ce qu'elles ont par elles-mêmes le pouvoir de développer le fluide d'où dépendent leurs effets. Ritter, en se bornant à employer des disques d'un seul métal, combinés avec des conducteurs humides, a construit des piles appelées *piles secondaires* ou *piles à charger*, et qui, sans avoir une action spontanée comme la pile de Volta, empruntent leur vertu de celle-ci, par l'intermède du contact. Pour mettre une de ces piles en activité, on fait communiquer ses deux extrémités avec celles d'une pile ordinaire, et au bout de quelques minutes, on supprime la communication. La pile secondaire se trouve alors électrisée, de manière que chacun de ses pôles est dans le même état que le pôle correspondant de la pile qui a servi à la charger, et l'on peut la substituer à cette dernière, pour obtenir des effets analogues, tels que la commotion, les étincelles, la décomposition de l'eau: Mais sa vertu s'affaiblit bientôt, et finit par disparaître après quelques instans.

686. Le célèbre inventeur de cette nouvelle pile en a modifié par degrés la construction, relativement au nombre et à l'arrangement respectif des disques de chaque espèce. Ainsi, il a d'abord employé à la construire trente-deux disques de cuivre et autant de disques de carton mouillé, formant trois séries, dans chacune desquelles il n'entrait que des disques d'une seule espèce ; les trente-deux disques de cuivre pris seize à seize, composaient les deux séries extrêmes, et la série intermédiaire renfermait de suite les trente-deux disques de carton.

---

(1) Extrait du Rapport fait à la Classe des Sciences Mathématiques et Physiques, le 8 messidor an XI, par Charles et Hallé, chargés d'examiner la pile dont il s'agit.

L'auteur déplaçait ensuite quelques-uns des disques de cuivre, pour les intercaler entre les disques de carton, jusqu'à ce qu'enfin ceux des deux espèces se succédassent un à un, en commençant et en finissant par le cuivre, auquel cas le nombre des disques de carton n'était plus que de trente-un. Il a disposé dans le même ordre soixante-quatre disques de cuivre, puis cent vingt-huit, entremêlés de disques de carton.

687. Ritter comparait chaque fois les trois effets principaux de la pile; savoir, l'effet chimique ou la décomposition de l'eau, l'effet physiologique ou la commotion, et l'effet physique ou la tension électrique. Il remarqua que ces effets ne s'accordaient pas entre eux, relativement à la variation de leur intensité, soit lorsqu'il multipliait les intercalations, sans augmenter le nombre des disques, soit lorsque l'alternative étant établie entre ceux des deux espèces, il donnait plus de longueur à la pile. D'abord les trois effets croissaient en même temps; mais l'effet chimique fut le premier à s'affaiblir, et devint nul à un certain terme. Au-delà, l'effet physiologique continua de s'accroître, pour rétrograder à son tour, et quant à l'effet physique, il alla toujours en augmentant.

688. Nous nous bornerons ici à considérer, sous le rapport de la théorie, le dernier mode de construction, dans lequel les disques des deux espèces sont disposés alternativement, parce-qu'il est comme la limite, dont tous les autres assortimens se rapprochent toujours davantage, à mesure que les intercalations deviennent plus nombreuses. Or on conçoit que l'action de la pile secondaire dépend, en général, de ce que les deux fluides dont ses extrémités se sont chargées par leur communication avec la pile de Volta, éprouvent une certaine difficulté pour se réunir, en obéissant à leur attraction mutuelle. Cette difficulté provient d'abord de ce que la propriété conductrice des disques humides est beaucoup moindre que celle des disques de cuivre; mais elle augmente encore, à raison d'une certaine résistance que les surfaces planes des deux substances hétérogènes opposent à la transmission des fluides, à l'endroit où elles sont en contact l'une avec l'autre. De là résulte dans le

mouvement des mêmes fluides une lenteur qui recule le moment où leur réunion fait disparaître la vertu de la pile.

Il y a donc aussi, au milieu de ces sortes de piles, un point ou plutôt un petit espace, qui est neutre, et en général la partie moyenne approche d'autant plus de l'état naturel, surtout dans les premiers instans, que la pile est plus longue. D'une autre part, les centres d'action étant aussi plus éloignés dans ce même cas, la force répulsive mutuelle des molécules du fluide situé vers chaque extrémité, agit avec plus d'énergie, parcequ'elle est moins balancée par la force contraire qui réside dans l'extrémité opposée. On voit par là pourquoi la tension des deux fluides, mesurée par l'électromètre, augmente dans les pôles, à mesure qu'on donne plus de longueur à la pile. Il n'en est pas de même de la commotion qui diminue, passé un certain terme. Pour en appercevoir la raison, il suffit de considérer que cet effet dépend non-seulement de la tension qui a lieu aux extrémités, et qui s'accroît, comme nous l'avons dit, avec la longueur de la pile, mais encore de la facilité avec laquelle s'opère la décharge, et qui est moindre dans une pile plus longue. Il suit de là que s'il y a un terme où l'obstacle qui provient de cette dernière cause soit prédominant, la commotion perdra de sa force. A l'égard de l'effet chimique, ou de la décomposition de l'eau, pour se faire une juste idée des circonstances qui déterminent son *maximum*, il faudrait avoir une connaissance plus exacte de ce qui se passe dans cet effet lui-même, dont la considération est, pour ainsi dire, le côté nébuleux de la théorie.

689. Avant l'invention de l'appareil dont nous venons de parler, on connaissait diverses expériences faites par d'autres physiciens, et dont les résultats ont de l'analogie avec ceux de la pile secondaire. Nous nous contenterons d'en citer une dont Volta est l'auteur. Ce savant ayant mis les deux extrémités d'une bande de papier imbibée d'eau pure, en communication avec celles d'une pile ordinaire, remarqua que chacune de ses deux moitiés avait acquis l'espèce d'électricité qui résidait dans le pôle correspondant de la pile, et que la densité électrique

diminuait de part et d'autre, en se rapprochant du milieu de la bande, où il y avait un point neutre (1). Cette bande a été appelée le *ruban de Volta*. Il est facile de voir que la conservation de la double électricité dont elle jouit, au moins pendant un instant, tient à l'imperfection de la faculté conductrice, soit dans le papier, soit dans l'eau dont il est imbibé. On conçoit même que l'effet dont il s'agit puisse avoir encore lieu, proportion gardée, par rapport à des substances beaucoup plus susceptibles que le papier et l'eau, de transmettre les deux fluides électriques. Car, comme il n'est aucun corps qui possède la faculté conductrice dans un degré absolu, la marche des deux fluides, le long de la surface, est toujours plus ou moins progressive; et ainsi, quelque légère que soit la résistance que le corps oppose au mouvement de ces fluides, leur densité peut être assez petite, pour que cette résistance devienne capable de balancer leur tendance à se réunir, et de retarder, pendant un temps appréciable, le retour du corps à l'état naturel.

Des Substances qui ont, par rapport à l'Electricité Galvanique, une faculté conductrice particulière.

690. Les corps qui tiennent le premier rang, relativement à la propriété de conduire l'électricité ordinaire, tels que les métaux, sont à la fois les meilleurs conducteurs de l'électricité galvanique; et ceux qui isolent le mieux les effets de la première, tels que le verre et les résines, conservent la même prééminence, relativement à la seconde. De plus, chacun de ces corps agit constamment de la même manière, toutes choses égales d'ailleurs, et, dans aucune circonstance, on ne le voit passer brusquement d'une propriété à celle qui lui est opposée.

691. Entre les deux extrêmes dont nous venons de parler, il existe une multitude d'intermédiaires, qui ayant, dans un de-

(1) *Voyez* l'excellent Exposé fait par Hallé, des principales expériences de Volta; Bulletin des Sciences de la Société Philom., nivôse an x, n° 58.

gré plus faible, la faculté soit de conduire l'action électrique, soit d'en arrêter la propagation, la manifestent aussi sans diversités, dans les phénomènes relatifs aux deux espèces d'électricité. Tels sont entre autres les organes des animaux.

Mais parmi les termes de cette série, le célèbre Erman en a découvert d'extrêmement remarquables, dont les propriétés, toujours uniformes dans les expériences électriques ordinaires, subissent dans celles qui ont rapport au galvanisme, des variations auxquelles on ne se serait pas attendu, ensorte que le même corps transmet ou arrête l'action électrique, suivant les circonstances dans lesquelles on le place.

692. Les substances qui présentent ces sortes d'exceptions aux lois jusqu'alors connues de la communication de l'électricité, se soudivisent en deux classes, distinguées entre elles par la diversité des phénomènes. Dans l'une se trouve la flamme de l'alkohol, et dans l'autre le savon alkalin parfaitement desséché. Nous allons décrire successivement les expériences faites par M. Erman sur ces deux substances, et dont nous avons vérifié en grande partie les résultats, dans le riche cabinet de Physique de M. Tremery, qui a bien voulu concourir, par ses soins éclairés, au succès des opérations.

693. On met en contact, avec l'un quelconque des pôles d'une pile isolée, un électromètre à feuilles d'or, très-sensible, et lorsque ces feuilles ont atteint le degré de divergence qui répond à la tension du fluide, on introduit dans la flamme d'une lampe à alkohol un fil métallique qui communique avec le pôle opposé à celui que touche l'électromètre, et un autre qui communique avec le sol. A l'instant l'électromètre acquiert un surcroît de divergence aussi considérable que dans le cas où la communication avec le sol étant établie à l'aide d'un conducteur métallique non interrompu, le zéro qui jusques-là se trouvait au milieu de la pile, passe dans le sommet avec lequel ce conducteur est en contact (657).

Après avoir attaché un électromètre à chaque pôle de la pile toujours isolée, on fait partir de ces mêmes pôles deux fils métalliques que l'on rapproche jusqu'à ce qu'ils entrent dans la

flamme de l'alkohol. L'appareil est disposé de manière que les fils métalliques et l'alkohol soient isolés comme la pile. Tant que cet isolement a lieu, les électromètres divergent à-peu-près comme dans le cas où les fils métalliques et la flamme n'existeraient pas. Mais si l'on plonge dans la flamme un autre fil métallique qui communique en même temps avec le sol, aussitôt le pôle vitré est déchargé, ou, ce qui revient au même, le zéro se trouve à l'endroit de ce pôle, et la divergence de l'electromètre appliqué au pôle résineux est à son *maximum*.

694. Ainsi, lorsque la flamme ne communique qu'avec un seul pôle, soit vitré soit résineux, et qu'en même temps elle est en communication avec le sol, elle agit comme corps conducteur. Si elle est en communication avec les deux pôles à la fois, et qu'elle reste isolée, elle agit comme corps non-conducteur. Enfin, si étant en communication avec les deux pôles, elle communique en même temps avec le sol, elle fait la fonction de corps isolant, relativement à l'effet du pôle résineux de la pile, et celle de corps conducteur relativement à l'effet du pôle vitré. On la voit, avec une double surprise, passer d'un extrême à l'autre, et devenir un point de réunion pour les deux extrêmes. M. Erman a varié ces expériences de différentes manières, qui toutes ont offert la confirmation des mêmes phénomènes.

695. Si l'on substitue à la flamme de l'alkohol un prisme de savon alkalin bien desséché, les effets sont les mêmes, excepté que le dernier présente l'inverse de celui qui avait lieu dans les expériences précédentes. Le prisme mis en contact par une de ses extrémités avec l'un ou l'autre des pôles de la pile, tandis qu'une chaîne ou une verge métallique descend de l'autre extrémité jusqu'au sol, propage l'électricité du pôle qui lui est contigu. Si l'on introduit dans ses extrémités des fils métalliques qui partent des deux pôles de la pile, et qu'on laisse le tout isolé, ces pôles continuent d'agir comme ils faisaient sans l'intervention du savon. Mais, les choses étant dans cet état, si l'on établit une communication entre un point quelconque du prisme de savon et le réservoir commun, à l'instant le pôle ré-

sineux est déchargé, et la tension du pôle vitré parvient à son *maximum*. Nous avons même obtenu cet effet, en prenant le point de communication du savon avec le sol, à une très-petite distance de l'extrémité dans laquelle était plongé le fil métallique qui partait du pôle vitré, c'est-à-dire de celui dont l'action restait isolée.

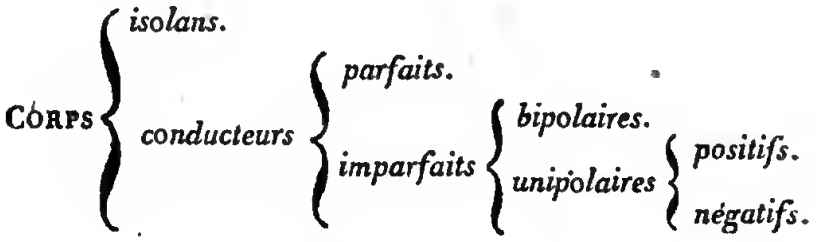
M. Erman a reconnu les mêmes propriétés dans la flamme du phosphore, et il les a entrevues dans quelques autres substances, telles que la gélatine desséchée à un certain degré, et l'ivoire. Mais d'autres masses de ces dernières substances n'ayant donné que des résultats équivoques, il s'abstient, pour le présent, de prononcer sur leur analogie avec le savon et le phosphore.

696. L'auteur, en résumant les différentes manières d'agir des corps que l'on peut mettre en communication avec les pôles de la pile, a établi une distribution méthodique de ces corps, assortie à leurs propriétés distinctives, avec une nomenclature propre à les désigner par des expressions simples et précises.

Il partage d'abord ces corps en deux grandes séries, dont l'une comprend les corps *isolans*, qui n'exercent aucune action conductrice, soit que leurs extrémités communiquent séparément, ou toutes les deux à-la-fois, avec les pôles de la pile. Tels sont les corps résineux et le verre. La seconde série est composée des corps *conducteurs*, qui se soudivisent en *conducteurs parfaits* et en *conducteurs imparfaits*. Les premiers, tels que les métaux, sont également susceptibles de décharger chaque pôle en particulier, et d'établir une circulation rapide d'un pôle à l'autre. Les conducteurs imparfaits, qui n'ont qu'une action faible ou simplement partielle, sont ou *bipolaires* ou *unipolaires*. L'auteur appelle *bipolaires*, ceux qui, en même temps qu'ils déterminent une circulation d'un pôle à l'autre, ont leurs deux moitiés dans des états opposés. De ce nombre sont l'eau commune et certains corps imbibés de ce liquide (1).

(1) Nous avons déjà parlé des effets de ces sortes de conducteurs, à l'occasion des piles que l'on a nommées *secondaires* (689).

Les conducteurs unipolaires sont ceux qui étant mis en communication avec les pôles de la pile et en même temps avec le sol, ne conduisent que l'électricité d'un seul pôle, et ils sont *unipolaires positifs* ou *unipolaires négatifs*, suivant que le pôle qu'ils déchargent est le pôle vitré ou le pôle résineux. A l'aide du tableau suivant, on saisira d'un coup d'œil cette distribution :



697. Les propriétés des corps qui ont donné lieu à la découverte de M. Erman, méritent également de fixer l'attention soit par la différence d'action que manifeste chacun de ces corps comparé à lui-même, dans les expériences relatives à l'électricité ordinaire et à l'électricité galvanique, soit par la diversité que présentent ces mêmes corps, comparés aux autres conducteurs de l'électricité.

Si l'on met, par exemple, le prisme de savon en contact par une extrémité avec le crochet d'une bouteille de Leyde électrisée, et par l'autre extrémité, avec la garniture extérieure, la réunion des deux fluides aura lieu, et la bouteille se déchargera, quoique imparfaitement (1), soit qu'on laisse le savon isolé, ou qu'on le mette en communication avec le sol, ce qui est tout différent de l'effet que produit le savon sur la pile. Au reste, quoique nous ignorions encore à quoi tient précisément cette différence, on en sera moins surpris, si l'on considère qu'il en existe une très-sensible dans la manière dont se charge l'un et

(1) Si, dans cette expérience, on tient le savon entre les doigts, on ressent une petite commotion, ce qui prouve que les organes sont de meilleurs conducteurs que le savon.

l'autre instrument, ainsi que dans les circonstances qui accompagnent leur décharge, à l'aide des moyens ordinaires.

698. Mais ce qu'il y a de plus singulier dans la découverte de M. Erman, c'est la ligne de démarcation qu'elle semble tracer entre les corps qui ont été soumis à l'expérience par ce physicien, et ceux qu'on avait essayés jusqu'alors. Parmi ces derniers, les uns, tels que le verre, s'opposent, dans toutes les circonstances, à la transmission de l'électricité; les autres, tels que les métaux, s'y prêtent, de quelque manière qu'on les emploie. Au contraire, les choses se passent à l'égard du savon et de la flamme de l'alkohol, comme si la faculté de transmettre l'électricité vitrée et celle de transmettre l'électricité résineuse, ne pouvaient exister que solitairement, et étaient incompatibles. Ainsi, quand le corps n'est en communication qu'avec un seul sommet de la pile, celle des deux facultés qui est relative à la position de ce corps s'exerce librement; lorsqu'ensuite le corps étant isolé et en communication avec les deux sommets de la pile, les deux électricités se présentent à la fois, les facultés conductrices, qui ne pourraient s'exercer que conjointement, sont sans effet, et la pile demeure dans le même état. Mais si l'on ouvre une issue à l'électricité, en établissant une communication entre le corps et le sol, alors rien ne s'oppose à ce que l'une des deux facultés conductrices puisse s'exercer indépendamment de l'autre, et c'est tantôt celle de l'électricité vitrée et tantôt celle de l'électricité résineuse qui a lieu de préférence.

Au reste, ceci n'est qu'une manière d'envisager les faits, propre à nous faire mieux saisir l'aspect sous lequel l'expérience nous les offre. Mais ce ne sera qu'après en avoir bien étudié toutes les circonstances, et les avoir soumis à de nouvelles observations, que l'on parviendra à en donner la véritable théorie, et à dévoiler les rapports qui les lient aux autres faits, à travers les contrastes qu'ils semblent former avec eux.

Des Poissons Electriques.

699. On connaissait depuis long-temps la vertu qu'a un poisson du genre des raies, d'engourdir les membres de ceux qui le touchent : de là le nom de *torpille* qu'on lui avait donné. Mais tandis que les premiers observateurs étaient embarrassés pour déterminer la cause de l'effet exprimé par ce mot, les Arabes avaient rencontré, comme par instinct, une dénomination puisée dans une analogie à-la-fois plus savante et plus vraie ; ils appelaient ce poisson *râad* ou *raasch*, nom qui, dans la langue de ces peuples, signifie *tonnerre*.

700. L'organe dont la torpille se sert pour exercer son pouvoir engourdissant, est composé d'un grand nombre de tubes aponévrotiques, d'une forme hexagonale et quelquefois pentagonale, rangés parallélement les uns aux autres autour des branchies, et dont une base est adjacente à la peau de dessus et l'autre à celle de dessous. Tous ces tubes sont exactement fermés à leurs extrémités par une membrane aponévrotique, qui s'étend de chaque côté sur toute la surface de l'organe. De plus, chaque tube est traversé horizontalement par des feuillets aponévrotiques placés au-dessus l'un de l'autre à de petites distances, ensorte que le tube peut être considéré comme un assemblage de cellules superposées. L'intérieur de ces cellules est rempli d'une substance qui, d'après les expériences de Geoffroy, est composée d'albumine et de gélatine (1). Enfin, tout cet appareil est fourni de nerfs remarquables par leur volume, qui s'insèrent entre les tubes, et finissent par se distribuer dans leur intérieur.

701. Réaumur a observé que quand la torpille voulait mettre son organe en activité, elle diminuait d'abord insensiblement la courbure de son dos, qui s'applanissait, et même

(1) *Voyez* la description détaillée que ce savant naturaliste a donnée de la torpille et des autres poissons pourvus de la même vertu, dans le cinquième cahier des Annales du Muséum d'Histoire Naturelle, p. 392 et suiv.

quelquefois devenait concave, puis le relevait par un mouvement subit qui lui faisait reprendre sa convexité (1). Si dans ce moment on touchait la torpille avec le doigt, on éprouvait une commotion semblable à un engourdissement.

702. Parmi les physiciens, les uns attribuaient ce phénomène à l'émission d'une infinité de corpuscules qui sortaient continuellement de la torpille, mais dont l'effluve était plus abondant en certaines circonstances, et qui, en s'insinuant dans les membres, les engourdissaient, soit parcequ'ils s'y précipitaient en trop grand nombre, soit parcequ'ils y trouvaient des routes peu assorties à leurs figures. Selon d'autres, l'action de la torpille consistait dans un ébranlement particulier qu'elle imprimait aux nerfs, et d'où résultait une sensation désagréable qui engourdissait le membre où elle était produite.

703. Une nouvelle opinion, qui n'avait pas plus de fondement que les précédentes, mais qui méritait mieux que l'on fît des efforts pour la détruire, est celle de Schilling, qui avait cru reconnaître dans l'anguille de Surinam, que l'on sait avoir la même vertu que la torpille, des effets magnétiques très-sensibles. Selon ce physicien, l'anguille, placée dans le voisinage d'un aimant, était attirée par ce corps et y restait attachée ; on parvenait avec peine à l'en séparer, et alors elle était languissante, et l'on pouvait la toucher impunément. De plus, l'aimant qui avait servi à l'expérience paraissait couvert de particules de fer, et lorsqu'on mêlait de la limaille de ce métal à l'eau dans laquelle l'anguille était plongée, celle-ci se ranimait et reprenait ses forces (2).

Ces assertions ont été entièrement détruites par plusieurs physiciens distingués, entre autres par Ingenhousz et Spallanzani, qui, ayant répété, avec beaucoup de soin, les expériences indiquées par Schilling, n'ont pas remarqué que l'ai-

(1) Mémoires de l'Académie des Sciences; année 1714.

(2) G. W. Schilling, *Diatribe de morbo in Europâ penè ignoto*, Jaws *dicto*, 1770.

mant exerçât la plus légère action sur l'anguille (1). M. Hahn, professeur de médecine à Leyde, qui a sagement discuté l'opinion de Schilling, observe que les fleuves d'Amérique, dans lesquels on trouve l'anguille de Surinam, charient du sable magnétique, et présume que des grains de ce sable s'étant attachés à la peau gluante du poisson, qui en était probablement tout couvert, au moment où Schilling a fait ses expériences, ont pu être une des principales causes de l'illusion qui a séduit ce physicien (2).

704. Le docteur Bancroft paraît être le premier qui ait soupçonné de l'analogie entre les phénomènes de la torpille et ceux que produit l'électricité. Walsh s'étant proposé de vérifier cette conjecture, fit plusieurs expériences, dont le bnt était de reconnaître si la torpille agirait de la même manière qu'une bouteille de Leyde chargée. On plaça un de ces poissons récemment retiré de l'eau sur une table où était une serviette mouillée. On suspendit au plancher deux fils courbes de laiton, à l'aide de deux cordons de soie qui les soutenaient par le milieu. L'un des fils de laiton reposait par un bout sur la serviette mouillée, et était plongé par l'autre bout dans un bassin plein d'eau posé sur une seconde table, où l'on avait mis quatre autres bassins semblables. Le second fil métallique descendait par une de ses extrémités dans l'eau du dernier bassin. Cinq personnes étaient rangées autour de cette seconde table. La première plongeait un doigt d'une main dans le bassin où était le fil de laiton en communication avec la serviette mouillée, et un doigt de l'autre main dans le bassin suivant. La seconde plongeait un doigt d'une main dans ce même bassin, et un doigt de l'autre main dans celui qui venait après, et ainsi de suite, jusqu'à ce que les cinq personnes communiquassent l'une avec l'autre, par l'intermède de l'eau contenue dans les cinq bassins. Walsh ayant pris le second fil de laiton

(1) Recueil de Mém. sur l'Analogie de l'Electricité et du Magnétisme, par H. Van Swinden; 1784, t. I, p. 439 et suiv.

(2) *Ibid.*, p. 438.

par la partie située hors de l'eau, toucha le dos de la torpille avec l'extrémité de cette même partie, et à l'instant les cinq personnes ressentirent une commotion qui, suivant le rapport qu'elles en firent, ne différait de celle que fait éprouver l'expérience de Leyde, qu'en ce qu'elle était plus faible. Walsh, qui n'était point compris dans la chaîne, et n'avait fait que tenir l'excitateur, ne reçut aucune impression. Cette expérience fut répétée plusieurs fois, même par huit personnes, et toujours avec un égal succès. On remarqua que chaque effort que faisait la torpille, pour donner la commotion, était accompagné d'une dépression de ses yeux, à laquelle on pouvait même reconnaître ses tentatives pour produire le même effet sur des corps inorganiques.

705. On a découvert la même vertu dans plusieurs autres poissons, dont les plus connus sont le *gymnote engourdissant* ou l'*anguille électrique* de Surinam, dont nous avons déjà parlé (703), et le *silure tremblеur*; d'où l'on voit que la propriété électrique, que l'on aurait été tenté de regarder comme l'indice d'un rapport générique entre les animaux qui la partagent, n'est qu'une qualité spécifique, qui forme comme des saillies dans des familles d'ailleurs très-distinguées les unes des autres. Il arrive ici à-peu-près la même chose qu'à l'égard des minéraux, où la propriété de s'électriser par la chaleur est dispersée, pour ainsi dire, dans des espèces de différentes natures.

On retrouve dans les poissons électriques différens de la torpille, un organe analogue au sien, qui est un assemblage de cellules composées de feuillets aponévrotiques entrelacés, et dont l'intérieur est rempli d'albumine et de gélatine. Mais la forme générale de cet organe et sa position varient d'une espèce à l'autre.

706. Walsh, en répétant les expériences de la torpille sur le gymnote engourdissant, dont la vertu est beaucoup plus énergique, parvint à obtenir un effet qui acheva de le confirmer dans l'opinion que le véritable agent était ici l'électricité. Il appliqua sur un morceau de verre une feuille d'étain,

dans laquelle il avait laissé une petite séparation. Cette feuille avait ses deux bords en communication avec les corps à travers lesquels se faisait la décharge du poisson. A l'instant de cette décharge, on voyait très-distinctement paraître une étincelle qui franchissait le petit intervalle pratiqué dans la feuille d'étain. Il fallait pour cela que le poisson fut exposé à l'air libre, et lorsqu'on essayait de faire l'expérience dans l'eau, on ne voyait plus d'étincelle (1).

707. Les effets des poissons électriques avaient été remarqués, depuis long-temps, par les pêcheurs. Redi rapporte que c'était une opinion généralement répandue parmi ces derniers, que la vertu de la torpille se communiquait à la main et au bras de celui qui la pêchait, par l'intermède du filet et du bâton auquel elle était suspendue (2). Les poissons doués de cette vertu s'en servent comme d'une arme invisible, pour transmettre à travers l'eau une violente secousse aux poissons d'une espèce différente, sur lesquels ils se jettent après les avoir étourdis, et dont ils font leur proie.

708. Terminons cet article par quelques détails sur la théorie à l'aide de laquelle on a essayé de lier les phénomènes dont il s'agit avec ceux de l'électricité ordinaire. Quoique Walsh eût tenté inutilement d'obtenir des attractions et des répulsions entre des balles de moëlle de sureau suspendues à des fils qui communiquaient avec la torpille, il n'avait pas laissé de regarder ce poisson comme une espèce d'instrument électrique animé, et il avait cherché à expliquer les différences qui modifiaient les rapports qu'il avait d'ailleurs avec la bouteille de Leyde. Il observait que la même quantité de fluide électrique qui, concentrée dans cette bouteille, était capable de produire les effets connus de tous les physiciens, n'agirait plus de la même manière, si on la raréfiait en la distribuant sur plusieurs grandes jarres, dont les parties, garnies de feuilles d'étain,

(1) *Philosophic. Transact.*, t. LXIII, p. 461, et t. LXIV, p. 465.

(2) *Experimenta circa res diversas naturales.*

offriraient

offriraient une surface totale quatre cents fois plus grande que celle des garnitures de la bouteille. Car alors il n'y aurait plus d'attractions ou de répulsions sensibles, tandis que le meme fluide, ainsi dilaté, serait encore capable de faire éprouver une commotion, à l'instant où l'on déchargerait l'appareil. Or cette distribution avait lieu dans la torpille, où le fluide électrique était répandu et raréfié sur la somme de toutes les surfaces des prismes qui formaient l'organe de ce poisson. C'était tout ce que la théorie pouvait alors suggérer de plus plausible ; et ce qui est très-remarquable, c'est que l'on n'ait pas balancé à faire dépendre de l'électricité ces phénomènes qui, dans la réalité, ne sont autre chose qu'un résultat de cette même action galvanique, qui, depuis, a donné naissance à de nombreuses discussions entre les savans des divers pays, sur la véritable nature du fluide qui la produit.

709. Les physiciens qui sont venus après Walsh ont continué de comparer les commotions données par la torpille avec celles que l'on éprouve en se servant de la bouteille de Leyde. Mais depuis les découvertes de Volta, c'est la pile qui doit être le véritable terme de comparaison. Ce célèbre physicien présume que parmi les substances humides dont l'organe de la torpille est composé, les unes sont propres à faire naître la vertu électrique par leur contact mutuel, et les autres à la transmettre ; ensorte que la superposition des différentes couches formées de ces substances est analogue à celle des métaux et des conducteurs imbibés d'eau qui se succèdent dans la pile (1). La détermination exacte de ces mêmes substances et de leurs fonctions est l'objet d'un problème intéressant, dont la solution, réservée aux efforts réunis de la Physique et de la Zoologie, offrira une nouvelle preuve des secours mutuels que les sciences peuvent se prêter, en marchant de concert vers un même but.

(1) Annales de Chimie ; 30 frimaire an x, p. 255.

Des Effets Chimiques de l'Electricité Galvanique.

Décomposition de l'Eau.

710. Deux savans Anglais, Carlisle et Nicholson, ayant plongé dans l'eau deux fils métalliques, dont l'un communiquait avec le disque supérieur d'une pile ordinaire, et l'autre avec le disque inférieur, apperçurent les indices de deux gaz qui se dégageaient aux extrémités de ces fils, et qu'ils reconnurent être les mêmes que ceux qui entrent dans la composition de l'eau (1). Pour faire cette expérience, on se sert ordinairement d'un tube recourbé, dont les deux branches sont remplies d'eau jusqu'à une certaine hauteur, et fermées avec des bouchons à travers lesquels on introduit les fils métalliques. Les extrémités de ces fils sont plongées dans l'eau, de manière à laisser entre elles un certain intervalle. L'oxygène paraît sous la forme de bulles, à l'extrémité du fil en communication avec le disque de zinc qui produit l'électricité vitrée, et l'hydrogène se dégage, sous la même forme, à l'extrémité du fil en contact avec le disque de cuivre qui forme la base de la pile, c'est-à-dire, de celui qui donne l'électricité résineuse. Si les métaux sont oxidables, on ne voit que très-peu de bulles à l'extrémité du fil qui répond au disque de zinc, parceque l'oxygène se fixe sur ce fil, en même temps qu'il le fait passer à l'état d'oxide.

711. Ce nouveau phénomène attira bientôt l'attention des savans, et surtout des chimistes, auxquels il offrait un problème délicat à résoudre, pour le concilier avec la théorie relative à la nature de l'eau. On voulut d'abord savoir si l'oxygène et l'hydrogène provenaient de la même molécule d'eau, ou de deux molécules distinctes. On avait remarqué que quand

(1) Bibliothèque Britannique, t. XV, p. 11.

on plongeait les fils dans deux vases séparés, il ne se faisait aucun dégagement de gaz; mais cela pouvait venir de ce que la communication nécessaire pour que la décharge de la pile eût lieu, se trouvait alors interrompue. Davy trouva un moyen fort simple pour prouver que c'était effectivement cette interruption qui empêchait les gaz de se dégager. Il plongea deux doigts d'une même main dans les deux vases, et aussitôt les gaz se montrèrent.

712. Ici se présentaient diverses questions. Peut-on concevoir que ce soit la même molécule d'eau qui se décompose, lorsqu'il y a un intervalle très-sensible entre les gaz qui se dégagent? et si la décomposition a lieu par rapport à deux molécules différentes, que devient l'hydrogène à l'endroit où l'on n'apperçoit que de l'oxygène, et que devient à son tour l'oxygène, à l'endroit où l'hydrogène seul se manifeste?

713. La solution la plus naturelle que l'on ait imaginée jusqu'ici de cette difficulté, est celle qui a été proposée par Monge et Berthollet (1). Selon ces savans, le fluide vitré a la propriété de dégager l'oxygène préférablement à l'hydrogène; c'est le contraire par rapport au fluide résineux. D'une autre part, l'eau a la faculté de recevoir, comme toutes les autres substances composées, différentes quantités relatives des principes qui concourent à sa formation. Ainsi l'eau de la rosée est oxygénée, et c'est pour cela qu'elle contribue au blanchîment des fils et des toiles qu'on expose à l'air; l'eau distillée, au contraire, est hydrogénée, et c'est à cela qu'elle doit cette saveur particulière qu'on lui fait perdre, en l'agitant fortement avec le contact de l'air. On peut donc supposer que dans l'expérience citée, l'eau de chaque vase, ou celle qui est renfermée dans chaque portion d'un même tube, conserve en excès celui des deux gaz qui ne manifeste pas sa présence.

714. Le phénomène de la décomposition de l'eau, par l'électricité galvanique, offrait un nouvel objet de comparaison entre les effets de la machine ordinaire et ceux de la pile. Van-

(1) Statique Chimique, t. I, p. 216.

Marum a obtenu le même phénomène, en faisant passer une forte décharge à travers un fil de fer plongé dans l'eau (1). Wollaston a répété l'expérience avec un fil d'or très-délié, tellement engagé dans un tube capillaire de verre, que son extrémité, qui était à peine visible, se trouvait au niveau de la surface du tube (2). Ce célèbre physicien, en réduisant ainsi à une extrême petitesse la quantité de métal soumise à l'action de l'électricité, est parvenu à décomposer l'eau, par une succession de petites étincelles qui sortaient d'un conducteur chargé à l'ordinaire. Il a essayé aussi de provoquer, par des expériences du même genre, le dégagement des deux principes composans de l'eau, en employant deux fils métalliques plongés dans ce liquide à distance. Mais il dit avoir constamment observé que chacun des deux fils donnait à la fois l'hydrogène et l'oxygène, tandis que l'action de la pile les détermine à se montrer séparément. Jusqu'à présent, il faut l'avouer, l'expérience n'a pas parlé assez clairement pour que la théorie relative au phénomène dont il s'agit ne laisse plus rien à desirer : il faudra de nouveaux faits qui puissent servir d'interprètes aux premiers.

Oxidation des Métaux.

715. Un autre effet chimique, qui s'opère spontanément dans toutes les piles construites à la manière ordinaire, est l'oxidation des surfaces métalliques en contact avec les conducteurs humides. Quelques physiciens ont pensé que cet effet avait une grande influence sur la production de l'électricité qui se développait dans la pile. Biot, dans la vue d'éclaircir cette question intéressante, a entrepris des expériences où il a porté cette exactitude et ces attentions éclairées, qui seules peuvent conduire à des résultats décisifs. Le condensateur dont il s'est

(1) Annales de Chimie, n° 121, p. 77.

(2) Bibliothèque Britannique, t. XVIII, p. 33 et suiv.

servi avait son plateau collecteur fixé sur une tige mobile de bas en haut, et à l'aide de laquelle on pouvait élever ce plateau jusqu'au niveau du sommet de la pile. On avait placé sur ce sommet un petit vase de fer rempli de mercure ; l'extrémité de la tige flexible du condensateur était aussi en fer. Celui-ci étant amené à la hauteur de la pile, on abaissait la tige flexible dans le mercure, au moyen d'un tube de verre verni, après quoi on abandonnait cette tige à son élasticité. De cette manière, le condensateur recevait toujours des charges comparables. Son contact avec le mercure, qui lui transmettait l'électricité de la pile, était toujours le même, et l'on pouvait le prolonger plus ou moins. Les quantités de fluide dont il se chargeait étaient mesurées à l'aide d'une balance électrique construite d'après la méthode de Coulomb (535).

716. On a pris une pile composée seulement de vingt couples de disques métalliques ; les conducteurs humides étaient des rondelles de drap imprégnées d'une dissolution de sulfate d'alumine. La pile étant isolée sur un gâteau de résine, le condensateur mis simplement en communication avec son sommet, ne prenait aucune électricité appréciable, par une suite du peu de hauteur que l'on avait donné à la pile ; et cette circonstance était favorable au succès de l'expérience, parce-qu'elle mettait à portée de mieux appercevoir l'augmentation d'électricité qui aurait pu survenir dans la pile, par l'action prolongée de l'oxidation ; il en résultait en même temps que la pile était bien isolée. D'une autre part, elle était en pleine activité ; car, si l'on appliquait le condensateur à son sommet, seulement pendant une demi-seconde, et que l'on touchât en même temps la base, on avait une charge qui, mesurée à l'aide de la balance, produisait une répulsion de 90^d.

On a établi ensuite une communication entre les deux extrémités de la pile, au moyen d'un fil métallique, qui, en contact d'une part avec la base, était plongé, de l'autre part, dans le vase de fer rempli de mercure qui reposait sur le sommet de la pile. On s'est assuré qu'alors le condensateur ne se chargeait pas, soit que l'on touchât, ou non, la base

de la pile, tandis qu'il était appliqué au sommet ; et ainsi la communication était bien établie.

On sait que, dans ce cas, le courant électrique circule dans l'intérieur de l'appareil, et que l'oxidation se fait avec autant de vivacité qu'à l'ordinaire. Maintenant, en supposant que le contact mutuel des métaux eût seul de l'influence sur le développement du fluide électrique, la quantité de ce fluide ne devait pas augmenter, puisqu'elle ne pouvait dépasser celle qui existait au moment où la pile était parvenue au degré de tension dont elle était susceptible. Si, au contraire, l'oxidation développait une quantité additionnelle de fluide, on devait retrouver celle-ci dans l'appareil, qui, n'étant point en communication avec le sol, n'avait pu rien perdre. Or, lorsqu'après un intervalle de deux minutes on détachait du sommet de la pile le fil conducteur, à l'aide d'un tube de verre verni, et qu'on appliquait ensuite le condensateur au même sommet, il n'y avait point d'électricité sensible ; et cependant la pile avait encore toute son activité, puisqu'il suffisait de toucher sa base pendant l'application du condensateur, pour que cet instrument se chargeât, comme auparavant, d'une quantité de fluide, dont la force répulsive était de 90^d.

717. Voici les conséquences que Biot déduit de ces résultats. Supposons que l'oxidation eût développé seulement assez d'électricité pour produire une répulsion de deux degrés ; cette quantité n'aurait pu échapper à l'observation. Or, d'après les calculs de l'auteur, les intensités électriques, mesurées par la balance de Coulomb, sont à très-peu près proportionnelles aux cubes des angles de répulsion (1). Donc la

(1) Nommons F la force répulsive, à une distance représentée par l'unité. Soit a l'arc de cercle parcouru en vertu d'une répulsion donnée. Si cet arc est assez petit pour être censé se confondre avec sa corde, la force répulsive à la distance a sera $\frac{F}{a^2}$. Soit T la force de torsion à la distance 1 ; elle sera Ta à la distance a ; et puisqu'il y a équilibre entre les deux forces, on aura $F = T.a^3$. Si, dans une autre expérience, la distance est désignée par a', et si l'on

quantité d'électricité produite par l'oxidation, pendant deux minutes, étant nécessairement plus petite que deux degrés, son rapport avec l'effet total, observé auparavant, était moindre que celui de 1 à 90000 ; et comme il ne fallait, dans le premier cas, qu'une demi-seconde pour charger le condensateur, la part qu'avait l'oxidation à cet effet instantané devait être au-dessus de $\frac{1}{20000000}$, quantité tout-à-fait inappréciable. Ainsi, quoiqu'à la rigueur l'oxidation doive développer de l'électricité dans la pile de Volta, l'effet de cette cause n'est nullement comparable à ce que produit le contact des métaux, sans cesse alimenté par la communication avec le sol.

718. Les physiciens qui ont attribué une si grande influence à une si faible cause, n'ont pas fait assez d'attention à la possibilité de diminuer cette influence, sans altérer la quantité d'électricité développée par l'appareil. Biot a construit des piles dans lesquelles les substances humides étaient remplacées par des disques de nitrate de potasse fondu, que l'on avait garantis avec soin de toute humidité. Ces piles donnent autant d'électricité que celles où les conducteurs sont imprégnés de dissolutions salines très-énergiques, par exemple, de celles qui renferment du sulfate d'alumine. Seulement, le condensateur met une demi-minute, au lieu d'une demi-seconde, à se charger, lorsqu'il communique avec le sommet d'une pile composée de vingt disques. L'auteur, en faisant varier la durée du contact, a trouvé que la marche de l'opération était soumise à une loi représentée par une logarithmique.

---

nomme F′ la force répulsive correspondante dans la même balance, on aura $F' = T.a'^3$. Donc $F : F' :: a^3 : a'^3$. A l'aide de ce résultat, on a l'avantage de pouvoir comparer entre elles les forces répulsives qui ont lieu dans plusieurs expériences consécutives, sans être obligé d'estimer les forces de torsion. L'auteur a étendu ce résultat aux attractions électriques, et il a aussi déterminé le rapport entre les deux forces qui se font équilibre, dans le cas où l'arc a devient trop grand, pour que l'on puisse, sans erreur sensible, le substituer à sa corde, qui mesure la distance réelle.

Analogie entre l'Electricité Galvanique et l'Electricité ordinaire.

719. Si nous faisons maintenant un retour sur les divers résultats que nous avons exposés, nous appercevrons partout une analogie frappante entre l'agent qui les produit et le fluide électrique. Arrêtons-nous d'abord aux phénomènes les plus propres à faire ressortir cette analogie. Une bouteille de Leyde, mise en contact avec la pile, se charge et devient capable de donner la commotion, précisément comme si elle eût été appliquée sur le conducteur d'une machine ordinaire. La pile produit des attractions et des répulsions semblables à celles des corps électrisés. Le fluide qu'elle fournit, accumulé dans un condensateur, donne des étincelles à l'approche d'un excitateur. Jusqu'ici la ressemblance des effets indique l'identité des causes. A la vérité, la sensation que l'on éprouve en touchant la pile par ses deux extrémités, n'est pas la même que celle qui est produite par la bouteille de Leyde ; mais c'est que la première est modifiée par le mouvement progressif et continu du fluide qui, au lieu de frapper les organes d'un seul coup, comme dans l'expérience de Leyde, les attaque par une succession rapide de petites impulsions ; et la preuve que c'est bien ce fluide qui est l'ame de la pile, c'est que, s'il passe dans la bouteille, le seul changement de vase lui rend tous ses caractères.

Nous avons vu qu'il était de même facile d'expliquer d'autres singularités de la pile, et en particulier la facilité avec laquelle un fil métallique, mis en contact avec elle, entre en combustion, tandis qu'à en juger d'après l'action peu sensible qu'elle exerce sur l'électromètre, on ne serait pas tenté d'attendre d'elle un effet si puissant.

L'action réciproque qu'exercent entre eux les autres corps solides, même les nerfs et les muscles d'un animal, est réellement du même genre que celle qui a lieu entre les métaux ;

et il était inutile d'avoir recours à un fluide particulier, pour expliquer des effets qui ont d'ailleurs tant d'analogie avec ceux que produisent les substances métalliques.

Le parallèle entre les deux électricités se soutient, relativement au phénomène de la décomposition de l'eau; et si les circonstances qui l'accompagnent varient, suivant que l'on emploie une pile ou une machine ordinaire, on entrevoit de même la raison de cette diversité, à travers celle qui existe entre les appareils. Les nouvelles recherches qui restent à faire pour dissiper le nuage encore répandu sur cette partie de la science, ne peuvent avoir pour résultat d'établir une distinction essentielle entre le galvanisme et l'électricité, mais seulement de concilier l'électricité avec elle-même.

Enfin, nous demanderons si ces différences, qui en ont fait présumer une entre les agens des phénomènes produits de part et d'autre, sont plus marquées que celles qu'on observe dans les effets qui dépendent uniquement de l'électricité ordinaire. Tel corps transmet rapidement le fluide électrique aux corps contigus, tandis que tel autre corps le tient enchaîné dans ses pores. Ici, c'est la communication par l'intermède du contact, qui fait naître la vertu électrique dans un corps; là, c'est le frottement; ailleurs, c'est l'action du calorique. La petite sensation que produit une simple étincelle que le doigt tire du conducteur, contraste encore plus avec la secousse qu'occasionne la bouteille de Leyde, que celle qui a lieu par la décharge de la pile. Partout le fluide électrique semble se multiplier par la diversité des phénomènes; et il nous avait tellement accoutumés à ses métamorphoses, que la nouveauté même de la forme sous laquelle il s'offrait dans le galvanisme naissant, semblait être une raison de plus pour le reconnaître.

VII. DU MAGNÉTISME.

720. L'AIMANT a été regardé, pendant long-temps, comme une simple pierre qui avait la propriété d'attirer le fer; et la trace de cette opinion s'est conservée dans le langage vulgaire, qui désigne encore par le nom de *pierre d'aimant*, la mine de fer naturellement pourvue de la propriété dont il s'agit. On aura jugé de sa substance par les particules pierreuses dont elle est souvent mêlée, et qui lui sont purement accidentelles.

721. Les anciens ont connu la vertu attractive que l'aimant exerce sur le fer; ils avaient même remarqué qu'il communiquait au fer la vertu d'attirer un autre fer. Mais quoique l'aimant, par cette sympathie qu'il semblait montrer pour le fer, dût être une de ces espèces de jouets que la curiosité se plaît à exercer, et qu'elle retourne de toutes les manières, la plus belle et la plus importante des propriétés de ce minéral, celle qui lui fait regarder le Nord par une de ses extrémités, et le Sud par l'autre, a long-temps échappé à l'observation. Il paraît que c'est vers le douzième siècle qu'a été faite cette découverte, dont plusieurs nations se disputent l'honneur.

722. Les premières théories sur le magnétisme se ressentent des idées systématiques qui dominaient alors parmi les physiciens. Les tourbillons de Descartes avaient tellement séduit les esprits, que l'on essaya d'en mettre partout. On en donna aux corps électriques. L'aimant eut aussi les siens. On imagina ensuite de simples effluves de matière magnétique, dont les molécules s'accrochaient les unes aux autres, ou prenaient un mouvement de recul, suivant la manière dont les effluves de deux aimants se rencontraient. Il y avait dans le fer des espèces de petits poils qui faisaient la fonction de valvules, pour permettre au fluide de passer dans un sens, et lui refuser le passage quand il se présentait dans un sens contraire. Telle était entre autres l'opinion de Dufay; et ce physicien célèbre, qui avait si bien vu le principe des mouvemens électriques, lorsqu'il en

vint au magnétisme, ne donna qu'une machine de son invention, au lieu du mécanisme de la nature.

723. Æpinus est le premier qui, pour expliquer les phénomènes du magnétisme, ait employé de simples forces soumises au calcul. Ce fut en tenant une tourmaline, qu'il conçut l'idée qui a servi de base à sa théorie. Il venait de découvrir que les effets de cette pierre étaient dus à l'électricité, et avait remarqué qu'elle repoussait par un côté, et attirait par l'autre, un petit corps électrisé. Il donna à ces deux côtés le nom de *pôles*, et ce mot, qui aurait pu ne passer que pour une expression plus commode, devint, dans son esprit, le véritable mot. Il vit dans la tourmaline une espèce de petit aimant électrique; et comparant les phénomènes des vrais aimants avec ceux des corps idio-électriques, il trouva que les actions des deux fluides pouvaient être ramenées aux mêmes lois, et joignit ainsi au mérite d'avoir perfectionné la théorie de l'électricité, et créé pour ainsi dire la théorie du magnétisme, celui d'attacher à un même anneau ces deux grandes portions de la chaîne de nos connaissances.

Coulomb, en reprenant des mains d'Æpinus la première de ces théories, pour lui donner un nouveau développement, avait par là même contracté une espèce d'engagement de perfectionner encore la seconde; et l'exposé que nous ferons bientôt de ses résultats, prouvera combien il a été fidèle à s'acquitter.

1. Des Principes généraux de la Théorie du Magnétisme.

724. Quoique le fluide magnétique soit soumis aux mêmes lois que le fluide électrique, diverses observations indiquent, dans l'état actuel de nos connaissances, une différence de nature entre l'un et l'autre. Le fer et une ou deux substances métalliques sont les seuls corps qui aient donné jusqu'ici des signes non équivoques de magnétisme, tandis que tous les corps sont susceptibles d'acquérir la vertu électrique. Si l'on présente

une tourmaline électrisée à une aiguille aimantée suspendue librement, quels que soient les pôles par lesquels les deux corps se regardent, la tourmaline n'exerce sur l'aiguille, pour la déranger de sa position, que la même force attractive qu'elle exercerait sur un corps quelconque; ce qui suppose que sa présence fait naître, dans l'aiguille elle-même, une vertu électrique indépendante de la vertu magnétique.

725. La correspondance entre les deux théories nous conduit à concevoir aussi le fluide magnétique comme composé de deux fluides particuliers, combinés entre eux dans le fer qui ne donne aucun signe de magnétisme, et dégagés dans le fer qui a passé à l'état d'aimant. Les molécules de chaque fluide se repoussent de même les unes les autres, et attirent celles de l'autre fluide; et Coulomb a prouvé, comme nous le verrons bientôt, que ces différentes actions suivent la raison inverse du carré de la distance.

726. Tout le fluide naturel d'un corps magnétique, même après sa décomposition, reste dans l'intérieur de ce corps; et, sous ce rapport, les aimants peuvent être assimilés aux corps idio-électriques (552). Les deux fluides, dégagés de la combinaison, se portent, par des mouvemens contraires, vers les extrémités de l'aimant, d'où ils exercent des actions analogues à celles de l'électricité vitrée et de l'électricité résineuse.

Mais avant d'aller plus loin, nous jetterons un coup-d'œil général sur l'ensemble que présente le magnétisme considéré dans toute son étendue, parceque le développement de la théorie, pour être bien saisi, demande que l'on ait au moins une idée de cet ensemble.

727. Tous les phénomènes que présentent les aimants que nous soumettons à l'expérience, ne sont, pour ainsi dire, que les différentes faces d'un fait fondamental, qui a été remarqué depuis long-temps. Il consiste en ce que si l'on choisit à volonté une des extrémités d'un aimant, et qu'on la présente successivement aux deux extrémités d'un second aimant, il y aura attraction d'une part et répulsion de l'autre entre les deux aimants. L'extrémité opposée du premier aimant produira des

effets inverses sur celles de l'autre aimant. En général, il y a dans chaque aimant deux points opposés qui manifestent des actions contraires, et auxquels on a donné le nom de *pôles*. On peut juger de l'énergie de ces actions, en faisant mouvoir un aimant en présence d'une aiguille magnétique suspendue librement ; on verra les extrémités de cette aiguille faire différens circuits, et quelquefois une révolution entière, pour satisfaire sa tendance vers l'équilibre.

728. Maintenant un phénomène extrêmement remarquable par sa continuité et par l'immensité des distances auxquelles il s'étend, consiste en ce que le globe terrestre fait à l'égard d'une aiguille aimantée la même fonction que l'aimant dont nous venons de parler ; ensorte que l'aiguille, abandonnée à la force de ce vaste corps magnétique, prend une direction qui va du Nord au Midi, et que nous verrons être celle qui s'accorde avec la manière d'agir de cette même force. Vient-on à la déranger, au moment où elle est immobile ? elle semble chercher sa première position, à la faveur des mouvemens qu'elle fait en deçà et au-delà, et finit toujours par s'y fixer de nouveau. Qu'auraient pensé les anciens philosophes, qui déjà prêtaient une ame aux aimants, quoiqu'ils ne connussent que leurs actions au contact, s'il leur était venu dans l'idée de suspendre un de ces corps à un fil ?

729. Ce que nous venons de dire nous conduit à une observation qui nous paraît intéressante, sur la manière de dénommer les deux fluides qui composent le fluide magnétique, et en même temps les pôles, ou les deux points de chaque aimant dans lesquels résident leurs actions. Le simple énoncé de l'hypothèse relative à l'existence de ces fluides, suffit pour faire concevoir que les répulsions magnétiques, semblables en cela aux répulsions électriques, sont dues à celles qui existent entre les fluides homogènes, et que les attractions proviennent de celles que les fluides hétérogènes exercent l'un sur l'autre. Il en résulte que quand une aiguille magnétique est dans sa direction naturelle, le pôle de cette aiguille, qui est tourné vers le Nord, est dans l'état contraire à celui du pôle de

notre globe qui est dans la même partie ; et comme ce dernier pôle doit être le véritable pôle Nord relativement au magnétisme, ainsi qu'il l'est à l'égard des quatre points cardinaux, il paraît plus convenable de donner le nom de *pôle austral* à l'extrémité de l'aiguille qui est tournée vers le Nord, et celui de *pôle boréal* à l'extrémité opposée. Nous adopterons, en conséquence, ces dénominations, qui sont déjà usitées en Angleterre ; et par une suite nécessaire, nous nommerons *fluide austral* celui qui réside dans la partie de l'aiguille la plus voisine du Nord, et *fluide boréal* celui qui sollicite la partie située vers le Midi.

730. Nous avons déjà vu qu'il en est du magnétisme comme il en serait de l'électricité, s'il n'existait dans la nature que des corps parfaitement idio-électriques. Chaque aimant n'a jamais que sa quantité naturelle de fluide, qui est constante, ensorte qu'il ne peut ni recevoir d'ailleurs une quantité additionnelle de fluide, ni céder de celui qu'il possède par sa nature, et que le passage à l'état de magnétisme dépend uniquement du dégagement des deux fluides qui composent le fluide naturel, et de leur transport vers les parties opposées du fer.

731. Plus ce métal est dur, et plus les deux fluides éprouvent de difficulté à se mouvoir dans ses pores ; et en général cette difficulté est toujours considérable et supérieure de beaucoup à la résistance que les corps mêmes le plus parfaitement idio-électriques opposent au mouvement interne des fluides dégagés de leur fluide naturel. Coulomb a donné à cette force le nom de *force coercitive*, comme à celle qui agit dans les corps idio-électriques (552).

2. De la Loi que suivent les Actions Magnétiques, à raison de la distance.

Pour établir une théorie des phénomènes magnétiques, il fallait surtout avoir déterminé la loi à laquelle sont soumises, à différentes distances, les forces qui agissent dans ces phénomènes. Plusieurs physiciens qui s'étaient occupés de la

recherche de cette loi, avaient eu recours à des moyens si imparfaits, qu'on ne doit pas être étonné de voir leurs résultats si peu d'accord entre eux, et avec la véritable loi (1).

732. La précision des méthodes employées par Coulomb, pour déterminer cette loi, ne laisse plus aucun doute qu'elle ne suive la raison inverse du carré de la distance, comme celle qui régit les actions électriques (536). Mais ici, la manière dont le fluide était distribué dans les corps que l'on soumettait à l'expérience, exigeait des considérations particulières, fondées sur ce que ces corps avaient deux centres d'action qui étaient dans deux états opposés, au lieu que les corps électriques, qui avaient servi à des recherches dirigées vers un but semblable, n'étaient sollicités que par une seule électricité, ce qui permettait de considérer toutes les forces comme réunies dans un seul centre d'action (41). Nous nous bornerons à dire pour le présent que, dans un aimant, les deux centres d'action sont à une petite distance des extrémités.

733. Coulomb est parvenu, par deux méthodes différentes, au but qu'il s'était proposé. La première consistait à faire osciller une petite aiguille de 27 millimètres, ou un pouce, de longueur, vis-à-vis du centre d'action inférieur d'un fil d'acier aimanté, long d'environ $6^{dec},8$, ou 25 pouces, de longueur, placé verticalement dans le plan du méridien magnétique.

Si nous faisons abstraction, pour l'instant, du centre d'action supérieur, nous devons concevoir que l'aiguille, tandis qu'elle fait ses oscillations, est sollicitée en même temps par deux forces, dont l'une réside dans le centre d'action inférieur du fil d'acier, et l'autre est la force que le globe exerce sur l'aiguille. L'effet de cette dernière, lorsqu'elle agit seule sur une aiguille dérangée de son méridien magnétique, est aussi de produire dans cette aiguille un mouvement d'oscillation. Or, avant l'expérience, Coulomb avait reconnu que l'aiguille, aban-

(1) *Voyez* les Expériences physico-mécaniques sur différens sujets, traduites de l'anglais de Hauksbée; Paris, 1754, t. II, p. 547, et suiv.

donnée à sa seule force naturelle, faisait 15 oscillations en 60 secondes. Mais il en est ici de l'aiguille comme d'un pendule qui oscille en vertu de la pesanteur. On prouve que l'action de cette force, pour faire osciller le pendule, est proportionnelle au carré du nombre d'oscillations faites pendant un temps donné, que l'on prend pour l'unité de temps. Ainsi, dans l'hypothèse présente, où l'aiguille est sollicitée à-la-fois par sa force naturelle et par celle du fil d'acier, on a la valeur de cette dernière en soustrayant le carré de 15, de celui du nombre d'oscillations faites par l'aiguille pendant 60 secondes.

Pour mettre de la précision dans les expériences, il fallait encore déterminer la distance à laquelle le fil d'acier était censé agir sur l'aiguille. Or nous verrons, dans la suite, que cette action dépend de deux forces, dont chacune s'exerce sur un des pôles de l'aiguille, et qui conspirent à lui imprimer le même mouvement ; et comme l'aiguille était fort courte, ensorte que les distances de ses pôles au centre d'action du fil d'acier différaient peu l'une de l'autre, on pouvait, sans erreur sensible, considérer le milieu de cette aiguille comme la distance moyenne entre celles auxquelles les deux actions s'exerçaient, et c'était relativement à ce point qu'il s'agissait d'estimer la force du fil en présence duquel l'aiguille oscillait.

734. Un exemple servira à répandre du jour sur tout ce qui vient d'être dit. L'aiguille placée d'abord de manière que son centre d'action était à 108 millimètres, ou 4 pouces, de distance du fil d'acier, fit 41 oscillations en une minute : placée ensuite à une distance double, elle ne fit plus que 24 oscillations en une minute. Donc les forces totales qui sollicitaient l'aiguille dans ses deux positions, étaient entre elles comme le carré de 41 est à celui de 24, ou comme 1681 à 576. Si l'on retranche de chacun de ces deux nombres le carré de 15 ou 225, on aura pour le rapport entre les forces du fil d'acier, celui de 1456 à 351, qui diffère peu de celui de 4 à l'unité (1).

(1) La différence 13 qui se trouve entre 351 et le quart de 1456, qui est 364, n'est très-sensible que parcequ'elle tombe sur les carrés des nombres

Et

Et parceque les distances correspondantes sont entre elles comme 1 est à 2, on en conclura que les forces sont en raison inverse du carré des distances.

Cependant le nombre d'oscillations faites en 60 secondes, ne donnait pas toujours exactement la quantité de l'action exercée par le fil d'acier. Cette exactitude n'avait lieu sensiblement qu'autant que l'aiguille était à des distances assez petites du fil d'acier, pour permettre de négliger la force du pôle supérieur de ce fil, qui alors était dirigée suivant une ligne peu éloignée de la verticale, et qui d'ailleurs agissait de beaucoup plus loin que le pôle inférieur. Mais lorsque l'aiguille était plus écartée du fil d'acier, alors la partie de la décomposition de cette force, qui était dans le sens horizontal, le même que celui suivant lequel agissait le pôle inférieur, devenait plus appréciable par rapport à la force de ce même pôle, et aussi n'était-ce qu'en faisant la petite correction qu'elle exigeait, que l'on parvenait à représenter la loi cherchée, avec toute la précision convenable.

735. L'autre méthode était analogue à celle que Coulomb avait employée relativement à l'électricité. Il faisait de la balance électrique une balance magnétique, en remplaçant, par une longue aiguille aimantée, le levier suspendu au fil métallique, et en substituant à la balle de cuivre une semblable aiguille placée verticalement sur le méridien magnétique, c'est-à-dire, celui qui coincide avec la direction naturelle de l'aiguille. Telle était la disposition respective des deux aiguilles, que quand celle qui était mobile allait toucher l'autre, en conservant sa position à-peu-près horizontale, le contact se faisait par un des centres d'action de la première, et le centre inférieur de la seconde.

La tendance naturelle de l'aiguille à revenir dans son méri-

---

d'oscillations faites par l'aiguille; ensorte que celle qui lui correspond, relativement à ces derniers nombres, n'est qu'une fraction de l'unité. Si l'on suppose, par exemple, que l'aiguille, dans sa seconde position, fasse 24 oscillations plus $\frac{1}{4}$, on aura, au lieu de 351, le nombre 363 plus une fraction, résultat qui se rapproche beaucoup de 364.

dien magnétique, était encore ici une action particulière qui se composait avec les actions réciproques des deux aiguilles; actions dont il s'agissait de trouver le rapport, en les démêlant de cette combinaison. Pour y parvenir, Coulomb compara d'abord la première force toute seule avec la force de torsion, et il trouva que si l'on tordait le fil métallique qui portait l'aiguille mobile, d'abord sous un angle de 35 degrés, l'aiguille s'écartait d'un degré de son méridien magnétique; et qu'ensuite si l'on tordait le fil sous des angles qui fussent successivement doubles, triples, quadruples, etc., de 35 degrés, l'aiguille allait se placer à 2 degrés, 3 degrés, 4 degrés, etc., de son méridien magnétique; et ainsi en retranchant de chaque torsion imprimée le nombre de degrés qui donnait la distance de l'aiguille au méridien, c'est-à-dire, la quantité dont le fil s'était détordu, en vertu du mouvement de l'aiguille, on trouvait que la force de l'aiguille, pour réagir contre chaque torsion, équivalait à autant de fois 35 degrés de torsion, que l'arc qui mesurait la distance de l'aiguille au méridien renfermait de degrés.

736. Cela posé, pour rendre plus sensible le procédé de Coulomb, nous allons donner encore ici l'exposé d'une de ses expériences. Soit *o* (*fig.* 70) la position du pôle inférieur de l'aiguille fixe, que nous supposons être le pôle Sud. Cette aiguille étant située verticalement dans le plan de son méridien magnétique, Coulomb met en contact avec ce pôle celui de même nom *s* de l'aiguille mobile *sn*, et cela de manière que le fil métallique n'ait aucune torsion : à l'instant l'aiguille fixe repousse l'aiguille mobile à une distance de 24 degrés, ensorte que cette dernière prend la position *s'n'*.

Or, la tendance à retourner au méridien agit en sens contraire du mouvement que vient de faire l'aiguille mobile, et par conséquent elle diminue d'autant la véritable répulsion, ou celle qui aurait lieu si cette tendance était nulle; c'est-à-dire, que celle-ci remplace la force de torsion qu'il faudrait ajouter à celle de 24 degrés pour maintenir l'aiguille à la même distance, en vertu de la seule répulsion. Mais, lorsque l'aiguille est à 24 degrés du méridien, la torsion qui mesure sa tendance

à y retourner est égale à 35 fois 24 degrés, qui font 840 degrés. Donc la répulsion qu'il s'agissait d'estimer équivalait à une torsion de 840 degrés, plus 24 degrés, ou de 864 degrés.

Les choses étant dans cet état, Coulomb donne au fil métallique une nouvelle torsion égale à trois circonférences de cercle, en sens contraire du mouvement de 24 degrés qu'avait déjà fait l'aiguille suspendue au fil, c'est-à-dire, dans le sens *bod*, et alors cette aiguille se rapproche à 17 degrés de l'aiguille fixe, en prenant la position $s''\ n''$. Or, trois fois 360 degrés font 1080 degrés; et puisque cette torsion n'est qu'une continuation de celle qui existait déjà (1), et qui se trouve réduite à 17 degrés, on aura 1097 degrés pour la torsion qui mesure la force répulsive mutuelle des deux aiguilles, moins la tendance à retourner au méridien. Mais cette tendance équivaut à une force de torsion de 17 fois 35 degrés, ou de 595 degrés; donc si l'on ajoute 595 degrés à 1097 degrés, la somme 1692 degrés donnera la torsion qui fait équilibre à la répulsion qu'il fallait évaluer.

Il suit de là que les deux répulsions sont entre elles comme 864 à 1692, c'est-à-dire, dans un rapport qui approche beaucoup de celui de 1 à 2. Mais les distances correspondantes étaient 24 et 17, dont les carrés 576 et 289 approchent beaucoup du rapport de 2 à 1, d'où l'on voit que les répulsions magnétiques suivent la raison inverse du carré des distances.

Nous avons choisi pour exemples les résultats qui conduisent aux rapports les plus simples. Mais l'expérience a prouvé que la loi des répulsions était constante, quel que fût le rapport entre les distances, et l'on a obtenu des résultats analogues, en substituant l'attraction à la répulsion.

(1) Si la torsion était produite par un mouvement imprimé immédiatement à l'aiguille mobile, il est évident que, pour continuer de tordre le fil, il faudrait faire tourner cette aiguille suivant le sens de son premier mouvement, dans un arc de 24 degrés. Mais comme la torsion agit par l'extrémité supérieure du fil, en vertu de la rotation imprimée à la tige qui tient ce fil suspendu, on conçoit aisément que pour continuer de tordre le fil, il faut faire tourner la tige en sens contraire du mouvement qui a déjà eu lieu vers le bas.

3. Des Attractions et Répulsions Magnétiques.

737. Nous sommes maintenant en état d'expliquer les phénomènes que produisent les aimants en vertu de leurs actions mutuelles. La plupart de ces explications ne sont, pour ainsi dire, que la traduction de celles que nous avons données (565) des effets que présentent les corps idio-électriques, dont une partie est à l'état vitré, et l'autre à l'état résineux, et particulièrement les tourmalines. Nous pouvons supposer, si nous voulons, que le fluide boréal d'un aimant fait la même fonction que le fluide vitré d'une tourmaline, et que le fluide austral est l'analogue magnétique du fluide résineux, et tout ce que nous avons dit de l'espèce de pierre dont il s'agit, s'appliquera comme de soi-même aux aimants. Ainsi le rapprochement des phénomènes qui appartiennent aux deux branches de connaissances, se trouve limité à ceux où chaque corps n'a que sa quantité naturelle de fluide, qui peut bien être décomposée, mais jamais augmentée ni diminuée. Par une suite nécessaire, le fluide électrique aura cela de particulier, qu'il se communique librement d'un corps à l'autre, et que, dans certaines circonstances, il se manifeste aux regards par des étincelles et des jets de lumière, tandis que le fluide magnétique agit en silence, et ne devient sensible que par les mouvemens qu'il imprime à d'autres corps placés dans sa sphère d'attraction ou de répulsion. Mais si cette manière d'agir ne promet pas des phénomènes aussi frappans que ceux auxquels l'électricité donne naissance, elle en offre qui méritent d'autant mieux d'être étudiés par des observateurs attentifs, que plus une cause semble affecter de se cacher, et plus elle fait paraître la sagacité de ceux qui en ont pénétré le mécanisme.

Equilibre de deux morceaux de Fer dans l'état naturel.

738. Lorsque deux morceaux de fer A et B, en présence l'un de l'autre, sont dans l'état naturel, leur équilibre, ainsi que celui des corps qui ne donnent aucun signe d'électricité, dépend de quatre forces qui se détruisent mutuellement. En nous bornant à considérer ces forces dans le corps A, parceque toute action est réciproque, nous devons concevoir que le fluide austral de ce corps agit par attraction sur le fluide boréal de B, et par répulsion sur son fluide austral; et que, d'une autre part, le fluide boréal de A agit par attraction sur le fluide austral de B, et par répulsion sur son fluide boréal. Un raisonnement semblable à celui que nous avons fait (560) par rapport aux actions électriques, prouvera que les quatre forces dont il s'agit ici sont égales entre elles; et comme il y a deux attractions et deux répulsions, il s'ensuit que toutes les forces sont en équilibre.

Action mutuelle de deux Aimants.

739. Nous avons vu (565) que quand deux corps idio-électriques ont leurs parties dans des états opposés, et qu'on les met en présence, ils s'attirent par leurs côtés différemment électrisés, et se repoussent par leurs côtés semblablement électrisés. De même, si deux aimants M, N (*fig.* 71) se regardent de manière que M tourne son pôle boréal B vers le pôle austral *a* de l'aimant N; le fluide boréal de B, par exemple, étant à une plus petite distance de l'aimant N que le fluide austral de A, nous pourrons considérer l'aimant M comme étant tout entier à l'état boréal, en vertu d'une force B′, égale à la différence entre les forces de A et de B; et la force B′ agissant plus par attraction sur le fluide austral du pôle *a* que sur le fluide boréal de *b*, qui est plus éloigné de l'aimant M,

l'attraction l'emportera ; et si les deux aimants sont libres de se mouvoir, ils s'approcheront jusqu'au contact et adhéreront l'un à l'autre ; si, au contraire, le pôle *b* était tourné vers le pôle B, comme le représente la *fig.* 72, il est facile de voir, en faisant le même raisonnement, avec une simple inversion dans les termes, qu'il y aura répulsion entre les deux aimants. Ce sera la même chose, si l'on suppose que ces aimants tournent l'un vers l'autre leurs pôles A, *a*, sollicités par le fluide austral. En général, deux aimants s'attirent par leurs pôles de différens noms, et se repoussent par leurs pôles de même nom.

Action d'un Aimant sur le Fer dans l'état naturel.

740. Concevons que le corps N (*fig.* 71) soit un barreau de fer, qui, étant d'abord à l'état naturel, se trouve placé dans la sphère d'activité de l'aimant M, de manière que cet aimant tourne vers lui son pôle boréal B. La force B′ de cet aimant, égale à l'excès de la force de B sur celle de A, agira pour décomposer le fluide de N ; et il est visible que l'effet de cette action sera d'attirer vers *a* le fluide austral dégagé de la combinaison, et de repousser vers *b* le fluide boréal ; c'est-à-dire, que le barreau N acquerra lui-même la vertu magnétique, ensorte que les pôles les plus voisins seront ceux de noms différens, et que les deux aimants s'attireront. Le résultat sera le même, si l'on suppose que le barreau de fer ait été présenté à l'aimant M du côté opposé, de manière que cet aimant tournât vers lui son pôle austral A. Concluons de là, que lorsqu'on met en présence d'un aimant un barreau ou un morceau quelconque de fer qui était auparavant à l'état naturel, l'action de l'aimant lui communique un magnétisme contraire à celui du pôle dont ce barreau était le plus voisin, ensorte que, dans ce cas, il y a toujours attraction entre les deux corps. Le physicien ne fait encore ici que se servir du fluide magnétique pour imiter une expérience électrique ; savoir, celle où un corps qui est dans nn certain état d'électricité,

commence par faire sortir un autre corps de son état naturel, et ensuite l'attire à lui (561).

741. Le barreau qui a reçu le magnétisme, agit à son tour sur l'aimant qui le lui a communiqué, en décomposant une nouvelle portion du fluide naturel de cet aimant, dont une partie est attirée vers le pôle le plus voisin du barreau, et l'autre repoussée vers le pôle opposé. La même chose arrive, à plus forte raison, lorsqu'on fait prendre le magnétisme à un barreau, par le contact immédiat d'un autre barreau déjà aimanté : il en résulte une espèce de paradoxe très-embarrassant pour les physiciens qui admettaient des tourbillons ou des effluves magnétiques ; c'est qu'un aimant pouvait devenir plus fort lorsqu'il paraissait avoir cédé une partie du fluide dans lequel résidait sa force. Au reste, ce surcroît de vertu acquis par l'aimant, n'est bien sensible qu'autant que la force coercitive de cet aimant n'est pas très-considérable.

742. Réaumur a observé le premier, avec surprise, qu'un aimant qui avait à peine la force nécessaire pour soutenir un morceau de fer d'un poids déterminé, l'enlevait plus aisément lorsqu'on plaçait ce fer sur une enclume. Cet effet s'explique de soi-même dans la théorie que nous avons adoptée : le fer ne peut être en contact avec l'aimant, sans devenir aimant lui-même ; dès lors il agit de son côté sur l'enclume pour l'aimanter aussi, et l'enclume, à son tour, réagit sur lui pour augmenter la quantité de fluide libre dans chacun de ses pôles, c'est-à-dire, qu'elle le rend plus attirable qu'il ne le serait sans elle.

743. Reprenons l'hypothèse où le corps N ayant passé de l'état naturel à celui de magnétisme, par l'action du corps M, les positions respectives des pôles étaient celles que représente la figure. Supposons de plus, pour mettre l'expérience dans le cas le plus favorable, que les deux corps soient en contact par leurs pôles B, *a*. Si l'on place derrière le corps N, auprès du point *b*, un nouveau corps qui soit dans l'état naturel, l'action de N le convertira, à son tour, en un aimant dont le pôle austral sera contigu au pôle *b*, et l'on pourra conti-

nuer cette série indéfiniment. Une manière assez curieuse de varier cette expérience, consiste à présenter un des pôles d'un petit barreau magnétique à l'une des extrémités d'une aiguille à coudre, puis à élever le barreau pour que l'aiguille y reste suspendue : l'extrémité inférieure de celle-ci sert ensuite comme d'amorce pour attirer une seconde aiguille, qui demeure de même suspendue à la première ; et ainsi de suite, tant que la force magnétique l'emporte sur la pesanteur qui agit pour rompre la chaîne.

744. Voici un autre résultat qui, tout élémentaire qu'il est aujourd'hui pour ceux qui connaissent tant soit peu la théorie de l'aimant, en offre une preuve si parlante, qu'il mérite, par cela seul, d'être cité. On a deux barreaux aimantés à-peu-près d'égale force, et l'on présente tour à tour à chacun d'eux une clef qu'il soit capable d'enlever, ce qui a lieu, quel que soit le pôle que l'on mette en contact avec la clef. On dispose ensuite un des barreaux sur une table, de manière qu'il la dépasse assez pour que la clef y reste suspendue. On pose alors l'autre barreau sur celui auquel la clef est adhérente, en faisant correspondre du même côté les pôles de différens noms ; à l'instant la clef tombe, parceque l'action que le pôle en contact avec elle exerce pour attirer à lui le fluide hétérogène de cette clef, est presque détruite par l'action répulsive du second barreau ; d'où l'on voit que l'explication du fait suppose nécessairement ce principe, que le fer mis en contact avec un aimant, devient aimant lui-même. On conçoit aussi la raison de l'espèce de surprise que cet effet occasionne, lorsque l'esprit n'est pas en garde contre le paradoxe qui se présente à l'œil, et qui consiste en ce qu'une force est détruite par l'addition d'une autre force qui, employée seule, produit en apparence un effet tout semblable.

Disposition des Parcelles de Fer en lignes courbes, par l'Action Magnétique.

745. L'action du magnétisme se transmet librement à travers tous les corps qui ne sont pas susceptibles de l'acquérir. Que l'on interpose une planche, une glace, une plaque de cuivre, etc., entre deux aimants, on ne remarquera aucune altération sensible dans leurs actions réciproques. Le charlatanisme a profité de cette faculté qu'ont les forces magnétiques de n'être arrêtées par aucun obstacle, pour donner un air de prestige à des phénomènes très-ordinaires, à l'aide d'un mécanisme qui en dérobait aux regards le véritable agent.

Mais ici l'expérience seule, dégagée de tout ce qui pourrait la déguiser, conduit à des résultats qui paraissent faits pour déconcerter la sagacité du physicien lui-même ; et jamais une théorie n'est mieux établie que quand ses principes, que l'on aurait cru d'abord ébranlés par les difficultés qui naissent de ces résultats, empruntent, au contraire, une nouvelle force des solutions heureuses qu'ils en fournissent. Nous avons déjà eu occasion de citer plusieurs de ces solutions, et ce qui va suivre nous en offrira de nouveaux exemples qui ne sont pas moins remarquables.

746. On dispose verticalement, à une distance de quelques centimètres, deux barreaux de fer aimanté, dont les pôles opposés sont tournés du même côté : on recouvre ensuite les extrémités supérieures avec une planche mince ou une feuille de papier parsemée de limaille de fer ; à l'instant les parcelles de cette limaille s'arrangent de manière à former une multitude de courbes plus ou moins évasées, qui se croisent toutes dans les points situés immédiatement au-dessus des extrémités supérieures des deux aimants. La *figure* 73 peut donner une idée de cet assemblage de courbes.

Les physiciens ont regardé ce phénomène comme une preuve évidente de l'action des tourbillons magnétiques. Les autres

expériences ne donnaient matière qu'à des conjectures sur l'existence de ces tourbillons : dans celle-ci on les voyait se peindre eux-mêmes.

747. Nous allons analyser le phénomène, pour en mieux faire saisir la véritable explication d'après les principes de notre théorie. Soit CG (*fig.* 74), un aimant qui ait son centre d'action boréale en B, et son centre d'action australe en A. Concevons que l'on suspende librement une aiguille de fer extrêmement courte, vers un point N plus voisin de B que de A : cette aiguille, que nous supposons avoir été jusques-là dans l'état naturel, deviendra elle-même un aimant ; et parceque l'on peut regarder alors l'aimant CG comme sollicité par une seule force, en vertu d'une certaine quantité B′ de fluide boréal (739), l'aiguille prendra une position oblique à l'aimant, telle que ba, de manière que a sera son pôle austral, et b son pôle boréal. Les choses étant dans cet état, concevons que l'on fasse mouvoir le centre c de l'aiguille, d'une très-petite quantité, le long de la ligne ad située sur le prolongement de cette aiguille, ensorte que son centre parvienne, par exemple, en g : en vertu de ce seul mouvement, l'extrémité a de l'aiguille se rapprochera du point B ; d'où il suit que l'aiguille prendra une nouvelle position moins oblique que la précédente, et dirigée suivant une ligne em qui fera, avec la ligne bd, un angle infiniment petit. Si l'on fait faire au centre c un nouveau mouvement le long de la ligne em, de manière que ce centre parvienne en f, l'aiguille prendra une nouvelle direction, telle que fl, infiniment peu inclinée sur la direction précédente. Si l'on continue de faire mouvoir de la même manière le centre de l'aiguille, il est aisé de voir que ce centre décrira une courbe $cgfn$, etc., dont les côtés coincideront avec les différentes directions de l'aiguille.

Il y aura un point de la courbe où l'aiguille qui s'écartera continuellement du parallélisme avec CG, prendra une direction nr perpendiculaire sur cette ligne. Au-delà de ce point, l'extrémité a de l'aiguille tendant toujours à se rapprocher de plus en plus du point B, les nouveaux côtés rs de la courbe

seront inclinés en sens contraire des premiers côtés *cg*, *fg*, etc. ; et enfin, lorsque l'extrémité *a* de l'aiguille sera infiniment près du point B, la courbe passera par ce même point. Au-dessous elle formera des côtés qui approcheront toujours davantage du parallélisme avec CG ; et lorsque le centre de l'aiguille sera en *p*, situé précisément au-dessous du centre O de l'aimant CG, la direction *xy* de l'aiguille sera parallèle à CG, à cause de l'équilibre entre les forces des pôles B et A. Au-delà de ce terme, la force du pôle A étant devenue prépondérante, la courbe s'infléchira vers le point A, et finira par y passer, en formant une nouvelle branche *xz*AM, semblable à la branche opposée.

Imaginons maintenant que l'on ait disposé sur la circonférence de cette courbe, les centres d'une multitude d'aiguilles très-courtes ; bientôt ces aiguilles prendront de telles positions, que chacune d'elles se dirigera suivant la tangente au point de la courbe, lequel se confondra avec le centre de l'aiguille ; et comme toutes ces aiguilles se regardent par leurs pôles de différens noms, elles adhéreront entre elles, et formeront elles-mêmes une courbe continue.

748. Si l'on substitue à ces aiguilles des parcelles de limaille, et qu'au lieu de supposer ces parcelles librement suspendues, on conçoive qu'elles soient couchées sur un plan où elles éprouvent un certain frottement, la résistance produite par ce frottement les empêchera de glisser vers les points A, B, qui agissent pour les attirer ; en même temps cette force attractive pourra être telle, que les parcelles de limaille prennent la direction qu'elles auraient, dans le cas où elles seraient mobiles autour de leurs centres, surtout si l'on seconde leur tendance, en secouant légérement le plan qui les soutient, ensorte qu'elles y formeront, par leur assemblage, la ligne courbe dont nous avons parlé. On comprend aisément que si le plan est couvert de parcelles de limaille, celles-ci se dirigeront sur les côtés de différentes lignes courbes relatives à autant de systèmes d'actions particuliers, et qui auront deux intersections communes aux points A et B, ce qui est conforme à l'observation.

Explication d'un Paradoxe Magnétique.

749. On peut expliquer, à l'aide du raisonnement, un petit phénomène qui a du rapport avec le précédent, et qui est d'autant plus piquant par sa singularité, qu'il semble mettre l'expérience en contradiction avec la théorie. Voici en quoi il consiste. On place sur une planche OR (*fig.* 75) un fil de fer délié, long de deux ou trois millimètres, et l'on tient au-dessus de cette table, à la distance de quelques centimètres, un barreau magnétique AB, dans une position verticale, dont l'extrémité inférieure, qui peut être indifféremment le pôle boréal ou le pôle austral, soit située de côté, par rapport au fil de fer. A l'instant ce fil s'élève par l'extrémité la plus voisine du barreau, en prenant une position oblique telle que *ba*. On imprime ensuite de légères secousses à la planche, de manière à faire un peu sautiller le fil de fer, et on le voit s'approcher continuellement du barreau, jusqu'à ce qu'il vienne se placer immédiatement au-dessous du pôle B, dans une situation verticale.

Jusqu'ici il n'est rien arrivé que l'observateur n'eût deviné d'avance. Maintenant si l'on place le barreau en dessous de la planche, ainsi qu'on le voit (*fig.* 76), et que du reste on opère comme dans le cas précédent, le fil *b a* se dressera de nouveau, en faisant un angle plus ou moins aigu avec la surface de la planche; mais à mesure qu'on imprimera de petites secousses à cette planche, le fil s'écartera continuellement du barreau, en se rapprochant du point R, quoiqu'il soit bien évident que le barreau exerce sur lui une force attractive.

750. Pour éclaircir ce paradoxe, reprenons le cas où le barreau était en dessus de la table. Soit B (*fig.* 77) le centre d'action inférieur de ce barreau. Au moment où le fil se dresse, nous pouvons le considérer comme un petit lévier *ab* dont le point d'appui est au point *b*, et dont l'extrémité *a* est sollicitée à la fois par l'attraction du pôle B et par la pesanteur qui agit pour le faire descendre. Or, cette dernière force s'oppose en

partie à l'effet de l'attraction de B, ensorte que l'angle *abs*, formé par la direction du fil avec le plan OR, est plus petit que l'angle B*bs* qui aurait lieu dans l'hypothèse où le fil se dirigerait suivant la ligne *b*B, qui passe par le pôle du barreau.

Supposons maintenant que, par l'effet d'une force quelconque, le fil *ab* se détache du plan OR, de manière que son centre de gravité *c* se relève un peu au-dessus de sa première position, et parvienne au point *c'* situé sur la verticale *u c z* : si nous imaginons, pour un instant, qu'il ait pris la position *a' b'* parallèle à *ab*, il ne la conservera pas; mais ses extrémités *b'*, *a'*, étant alors toutes les deux libres de se mouvoir, le fil tournera autour du point *c'*, et tendra à se diriger sur une ligne qui passe par le pôle B, ce qui ne peut avoir lieu sans que son extrémité *b'* ne s'abaisse vers le plan OR; et lorsqu'elle le touchera, le fil ayant une direction telle que *b'' a''*, dont le prolongement passe par le pôle B, ou à peu près, son extrémité *b''* sera plus voisine de la verticale *s* B, que lorsqu'il avait la position *b a*. En même temps, la résistance du plan OR offrant de nouveau un point d'appui au petit lévier qui repose sur lui par son extrémité *b''*, celle-ci restera fixe, tandis que l'extrémité opposée *a''* descendra un peu par l'effet de la gravité, de manière que l'angle *a'' b'' s* diminuera d'une petite quantité, en restant cependant toujours plus ouvert que le premier angle *a b s*.

Pendant la descente du point *a''*, le centre de gravité *c'* quittera la verticale *u z*, et se placera dans un point *x*, situé sur un arc dont *b'' c'* sera le rayon, d'où il suit qu'il se rapprochera de *s* B. Si l'on imprime au plan OR une seconde secousse, et que l'on imagine une nouvelle verticale, qui passe par le point *x*, et le long de laquelle se meuve le centre de gravité du fil, le même effet se répétera, et ainsi de suite, ensorte que le point *b''* aura un mouvement progressif vers le point *s*, et finira par coïncider avec lui, en se dirigeant dans le sens de la verticale *s* B.

751. La supposition que nous avons faite d'une verticale dont le centre de gravité du fil suivait la direction, en s'élevant au-

dessus de sa position précédente, n'est pas tout-à-fait conforme à la vérité. Car l'aimant AB ne s'éloigne pas assez du fil, pour que l'on puisse regarder comme insensible la quantité dont les distances des pôles a, b, de ce fil au pôle B de l'aimant diffèrent l'une de l'autre, relativement à elles-mêmes. Il en resulte que l'attraction du pôle B sur le pôle a de l'aiguille est un peu plus forte que la répulsion sur le pôle b. Par une suite nécessaire, le centre de gravité du fil, tandis qu'il monte, en vertu de la secousse imprimée au plan OR, laquelle est censée agir suivant une direction diamétralement opposée à la pesanteur, ne se meut pas exactement en ligne verticale; il dévie un peu vers l'aimant AB, et le même effet se répète pendant la descente du fil. Mais il est aisé de voir que l'action de la petite force dont il s'agit ne s'oppose pas au mouvement progressif du fil vers l'aimant; elle ne fait que détourner un peu ce fil de la route qu'il tend à prendre, en vertu des autres forces qui le sollicitent.

752. Essayons maintenant d'analyser de même l'effet inverse que présente le phénomène, lorsque l'aimant est situé en dessous du plan OR, comme on le voit (*fig.* 78), où l'on a supposé que le pôle A, le plus voisin du plan OR, était le pôle austral, ce qui est indifférent pour le résultat. Dans cette hypothèse, le fil de fer ayant pris de lui-même la direction $b\,a$, si l'on donne une petite impulsion au plan OR, et que c' soit la nouvelle position du centre de gravité du fil, il est facile de voir que ce fil, au lieu de rester sur une direction $a'\,b'$ parallèle à $a\,b$, s'abaissera par son extrémité b', de manière que quand celle-ci touchera le plan OR, la direction du fil sera sur la ligne $a''\,b''$ A, qui passe par le pôle A de l'aimant, d'où il suit que l'extrémité b'' sera plus éloignée de la verticale A s que dans sa première position. Mais au même moment le fil soutenu au point b'' par le plan descendra un peu par son extrémité a'', en vertu de la pesanteur, et son centre de gravité se transportera à la droite de la verticale $u\,z$; après quoi il est facile de concevoir comment les nouvelles secousses imprimées au plan OR détermineront le fil à se rapprocher du

point R, de manière que l'attraction exercée sur lui par l'aimant paraîtra s'être changée en répulsion.

753. Nous avons encore fait abstraction de la tendance qu'a le centre de gravité du fil, pour se porter vers l'aimant, qui attire davantage le pôle *b* qu'il ne repousse le pôle *a*. Or, cette attraction agit pour contrarier le mouvement rétrograde du fil *a b* ; mais son effet n'étant que le résultat de la légère différence qui existe entre les forces que l'aimant exerce sur les deux pôles du fil, paraît devoir être plus que balancé par celui des deux forces conspirantes qui agissent l'une sur le pôle b', l'autre sur le pôle a', pour faire tourner le fil autour de son centre, et le diriger suivant $a'' b''$. L'observation de ce qui se passe dans l'expérience, où chaque nouvelle secousse imprimée au plan OR détermine le fil à s'éloigner de l'aimant, vient ici à l'appui du raisonnement, et prouve que c'est réellement le second effet qui prédomine.

754. Nous indiquerons une expérience très-facile à faire, qui offre un nombreux assemblage de petits phénomènes semblables à celui dont nous venons de donner l'explication. Au lieu d'un seul fil de fer, on met sur la planche OR une pincée de limaille, et on dispose l'aimant en dessous de la planche, de manière que sa direction prolongée passe par le centre de l'endroit recouvert de limaille. A mesure qu'on agite la planche par de légères secousses, on voit les parcelles de limaille s'écarter de toutes parts, comme si elles étaient mues sur les rayons d'un cercle, et laisser à l'endroit qu'elles occupaient d'abord un vide autour duquel elles s'arrangent en forme de disque.

Distribution des deux Fluides dans un Aimant.

755. Avant d'aller plus loin, il est nécessaire de donner une idée de la manière dont les deux fluides magnétiques sont distribués dans l'intérieur d'un aimant. Cette distribution, qui est

analogue à celle du fluide électrique autour d'un conducteur, ou à celle des deux fluides électriques dans une tourmaline, se fait, en général, de manière que les densités magnétiques étant très-considérables vers les extrémités, décroissent ensuite rapidement, et deviennent presque nulles dans un espace sensible situé vers le milieu de l'aimant. Il en résulte que les centres d'action sont, comme nous l'avons dit (732), à une petite distance des extrémités. Par exemple, cette distance n'était que de $22^{mill.},5$, ou 10 lignes, dans un fil d'acier de $67^{cent.},5$, ou 25 pouces de longueur. On jugera à-peu-près de cette proximité des centres d'action à l'égard des extrémités d'un fil ou d'un barreau d'acier aimanté, en tenant ce barreau dans une position verticale, vis-à-vis d'une aiguille de boussole suspendue librement, et en le faisant monter et descendre, de manière que les différens points de sa longueur se présentent successivement à l'aiguille; on remarquera dans cette aiguille une tendance sensible vers un certain point du barreau, qui sera peu éloigné de l'extrémité située du même côté.

756. Cette distribution des deux fluides magnétiques dans un aimant, dépend de ce que les forces de ces fluides suivent la raison inverse du carré de la distance. A en juger par les apparences, l'action de chaque moitié de l'aimant provient uniquement de la présence d'un seul fluide à l'état de liberté. Mais tout nous conduit à admettre une hypothèse très-heureuse de Coulomb, que nous avons déjà indiquée en parlant de l'électricité (623). Elle consiste à regarder chaque molécule de fer comme un petit aimant, qui a son pôle boréal et son pôle austral égaux en force l'un à l'autre. Tous les petits aimants dont un barreau magnétique est l'assemblage, sont rangés sur différentes files parallèles à l'axe du barreau, de manière que le pôle boréal de l'un est contigu au pôle austral du suivant, ou réciproquement. Nous allons essayer de faire voir comment cette hypothèse offre l'équivalent de ce qui aurait lieu, si chaque moitié de l'aimant était dans un seul état de magnétisme.

757. Concevons d'abord une aiguille infiniment déliée mn (*fig.* 79), composée d'une infinité de petites aiguilles partielles

c,

c, d, e, f, etc., et supposons que cette aiguille ait été mise à l'état de magnétisme par l'action d'un aimant. Dans ce cas, toutes les forces contraires des pôles contigus b, a'; b', a'', etc. (1), seront égales entre elles, ensorte que leurs actions se réduiront à zéro. Quant aux forces des deux pôles extrêmes, savoir, celle du pôle a de l'aiguille c, et celle du pôle b de l'aiguille r, qui seules sont en activité, à cause de leur isolement, comme les quantités de fluide dont elles dépendent ne résident que dans deux points, elles sont censées agir sur tous les pôles intermédiaires à des distances infinies, et par-conséquent leur action est nulle pour altérer l'état de l'aiguille entière.

Si donc il existait une pareille aiguille magnétique, ses deux centres d'action seraient situés dans ses points extrêmes, et tout l'espace intermédiaire serait censé être dans l'état naturel.

758. Mais l'hypothèse d'une aiguille infiniment déliée n'est qu'idéale, et tous les aimants ont nécessairement une épaisseur plus ou moins sensible. Or, nous pouvons faire entrevoir, à l'aide du raisonnement, quel doit être le résultat de l'influence mutuelle des différentes aiguilles semblables à mn, dont un aimant est censé être l'assemblage, pour mettre cet aimant dans l'état où nous l'offre l'observation.

Imaginons que MN étant l'aimant dont il s'agit, la distribution des deux fluides soit d'abord la même dans chacune de ses aiguilles composantes, que celle qui a lieu dans l'aiguille mn; supposons, de plus, que l'on mette celle-ci en contact avec l'aimant MN, ensorte qu'elle ne forme plus qu'un avec lui, et examinons l'action qu'il doit exercer sur les différens points de cette aiguille. Si nous divisons l'aimant MN, par la pensée, en autant de parties C, D, E, F, etc., qu'il y a d'aiguilles partielles dans l'aiguille mn, nous aurons une suite d'aimants dans lesquels les forces des pôles contigus B, A′; B′, A″, etc., se détruiront mutuellement; et ainsi MN, dans la supposition

(1) La lettre b indique ici, comme à l'ordinaire, le pôle boréal, et la lettre a le pôle austral.

présente, ne pourra agir sur l'aiguille mn, qu'à l'aide des forces qui ont leur siége dans les pôles extrêmes, savoir, le pôle A de la partie C, et le pôle B de la partie R. Or, chacune de ces forces est celle d'un fluide qui s'éteud sur une surface égale à la base de la partie C ou R, composée d'une infinité de points, d'où il résulte qu'elle agit à des distances finies sur toutes les petites aiguilles c, d, e, f, etc.

Maintenant le fluide du pôle supérieur A attire à lui le fluide boréal du pôle b, b', b'', etc., de chacune de ces aiguilles, et repousse le fluide austral du pôle a, a', a'', etc. Donc il y aura un certain nombre de molécules hétérogènes qui se réuniront dans chaque aiguille, et recomposeront une partie du fluide naturel. Mais le fluide du pôle A agit plus fortement sur les aiguilles voisines de l'extrémité m, et plus faiblement sur celles qui sont à une certaine distance de m. Donc la quantité de fluide naturel recomposé décroîtra d'une aiguille à l'autre; et par une suite nécessaire, les portions de fluide qui restent à l'état de dégagement iront, au contraire, en croissant depuis l'extrémité m. Les mêmes effets auront lieu en sens contraire, en vertu de l'action du pôle inférieur B sur les aiguilles r, o, h, etc.

Il suit de là que si l'on représente par a, b, a', b', etc., les quantités de fluide qui restent à l'état de dégagement dans les aiguilles dont ces lettres nous ont servi à désigner les pôles, et si l'on compare les deux aiguilles c, d, on aura a' plus grand que b; de même, en comparant e avec d, on aura a'' plus grand que b', etc.; d'où nous conclurons que l'action $a' - b$ des deux premiers pôles, ainsi que l'action $a'' - b'$ des deux suivans, équivaut à celle d'un pôle austral animé d'une force égale à l'excès de a' sur b, ou de a'' sur b'. En faisant un raisonnement semblable à l'égard des pôles suivans, jusqu'au milieu de l'aiguille mn, on en conclura que toute cette moitié est dans le même cas que si elle était sollicitée par une suite de quantités décroissantes de fluide austral. Ce sera le contraire par rapport à la moitié inférieure de l'aiguille mn. Les différences $b' - a$, $b'' - a'$, etc., entre les quantités de fluide qui appartiennent

aux aiguilles partielles r, o, etc., représenteront chacune une force boréale, et toute cette seconde moitié de l'aiguille sera censée être à l'état de magnétisme boréal. De plus, les points également distans des extrémités étant sollicités par des forces égales et contraires, on aura, au milieu de l'aiguille, $b''' - a''' = 0$; d'où il suit que ce point sera neutre (1).

Mais parceque les forces de l'aimant MN suivent la raison inverse du carré de la distance, elles agiront avec une intensité incomparablement plus grande sur les aiguilles voisines des extrémités m, n, que sur celles qui sont à une certaine distance de ces extrémités; ensorte que si l'aiguille mn est un peu longue, l'effet de ces forces deviendra presque nul sur la partie moyenne de l'aiguille. Ainsi les fluides conserveront à-peu-près leur état primitif dans cette partie, d'où il résulte qu'elle ne différera pas beaucoup de l'état naturel.

Ce que nous avons dit de l'aiguille infiniment déliée mn, a également lieu par rapport à toutes les aiguilles dont un aimant MN d'une épaisseur sensible est l'assemblage, et cela en vertu des actions réciproques de ces aiguilles; de manière qu'à l'instant même où cet aimant a été tiré de l'état naturel, il s'est

(1) Pour rendre cette explication plus sensible, servons-nous de nombres pris arbitrairement, et représentons d'abord par $+16$ et -16 les quantités de fluide qui sollicitaient les différens pôles a, b, a', b', etc., dans l'état primitif de l'aiguille, le signe négatif indiquant ici le fluide boréal. Supposons qu'en vertu du contact de l'aimant MN, et de la nouvelle distribution qui en résulte relativement aux deux fluides renfermés dans l'aiguille mn, l'état de l'aiguille partielle c soit représenté par $+6-6$, celui de d par $+12-12$, celui de e par $+15-15$, celui de f par $+16-16$; et que de même, en partant de l'extrémité opposée, l'état de r soit représenté par $-6+6$, celui de o par $-12+12$, celui de h par $-15+15$, at celui de g par $-16+16$; il est aisé de voir que les quantités de fluide austral qui resteront en activité dans la moitié supérieure de l'aiguille, formeront cette série: $+12-6$, $+15-12$, $+16-15$, $+16-16$, on plus simplement, 6, 3, 1, 0. De même les quantités de fluide boréal qui resteront en activité dans la moitié inférieure de l'aiguille, donneront cette série: $+6-12$, $+12-15$, $+15-16$, $+16-16$, on -6, -3, -1, 0. Ainsi chaque moitié de l'aiguille sera censée être sollicitée par une seule force égale et contraire à celle de l'autre moitié.

établi dans son intérieur une distribution générale des deux fluides, semblable à celle que nous avons considérée par rapport à une seule aiguille, pour aider nos conceptions.

Magnétisme complet d'un Segment de Barreau aimanté.

759. Il est facile maintenant de résoudre la difficulté que présente un phénomène qui a beaucoup étonné les physiciens, et dont Æpinus lui-même n'a donné qu'une explication peu satisfaisante. On coupe un barreau magnétique vers l'une de ses extrémités, de manière à en détacher une portion qui peut avoir si peu de longueur que l'on voudra, et à l'instant cette portion devient elle-même un aimant complet, qui a encore ses deux moitiés sollicitées par des forces égales et contraires. Comment concevoir, dans les théories ordinaires, le double magnétisme dont se trouve pourvu tout-à-coup, par une sorte de création, ce segment qui était auparavant tout entier dans un état unique, semblable à celui de la partie dont il a été ensuite séparé?

Pour faire disparaître ce paradoxe, reprenons d'abord l'hypothèse de l'aiguille infiniment déliée mn, qui offre, comme nous l'avons vu, une succession de pôles opposés, égaux en forces, et contigus deux à deux, excepté le premier et le dernier, qui sont isolés. Il est bien évident que si l'on cassait cette aiguille à un endroit quelconque de sa longueur, chaque partie aurait encore à ses extrémités deux pôles animés de forces égales et contraires, dont l'une, qui était d'abord isolée, avait dès lors toute son intensité, et l'autre, qui était balancée par la force du pôle contigu, aurait été mise en activité, en se séparant de ce pôle.

La même chose aura lieu, si l'on suppose qu'une portion de l'aimant MN ait été détachée du reste, avec cette différence, que le pôle situé à l'endroit de la division aura d'abord plus de force que celui de l'extrémité opposée, puisque dans

l'aimant encore intact les quantités de fluide allaient en croissant d'un pôle à l'autre, depuis chaque extrémité. Mais à l'instant même, l'état de tout le système changera de manière à satisfaire aux conditions de l'équilibre, qui exige que tout soit semblable de part et d'autre, à égale distance des extrémités.

760. Nous avons vu (623) que les tourmalines offrent un phénomène semblable ; et il est effectivement naturel de penser que les molécules intégrantes des corps, soit magnétiques, soit électriques, étant de petits cristaux complets, qui ont des formes similaires, et qui sont disposés symétriquement dans le corps entier, chacune d'elles doit aussi subir complétement la double action de l'électricité ou du magnétisme, pour mettre ses deux moitiés dans des états différens ; ensorte que la distinction de ces mêmes états, relativement aux corps entiers, n'est qu'une suite de ce qui a lieu pour chaque molécule. L'effet de l'ensemble s'assimile à celui des parties composantes ; et d'après cette hypothèse, très-plausible, il n'y a plus rien d'extraordinaire dans les phénomènes produits par ces corps, que l'on pourrait appeler les *polypes du règne minéral.*

4. De la Communication du Magnétisme.

761. Nous avons déjà parlé (740) de l'action exercée par un aimant sur un morceau de fer qui, étant d'abord à l'état naturel, se trouve ensuite placé dans la sphère d'activité de cet aimant, et nous avons vu qu'il acquérait lui-même la vertu magnétique, de manière que sa partie tournée vers l'aimant était dans un état opposé à celui du pôle qui avait agi sur elle à une plus grande proximité. Nous avons maintenant à exposer les différens moyens qui ont été imaginés pour porter au plus haut degré possible ce magnétisme acquis par communication. Mais il faut auparavant donner une idée d'un résultat qui a lieu quelquefois, par suite d'une distribution irrégulière des

deux fluides mis en mouvement dans un corps qui passe à l'état de magnétisme.

Des Points Conséquens.

762. Supposons que AB (*fig.* 80) soit un aimant vigoureux qui agisse sur un barreau de fer *m n*, pour lui communiquer la vertu magnétique ; l'action de cet aimant, qui dépendra de l'excès B′ de la force du pôle boréal B sur celle du pôle austral A (740), attirera du fluide austral *a* dans les parties du barreau voisines de *n*, et repoussera du fluide boréal *b* dans les parties situées vers *m*. Or, deux causes font obstacle au mouvement de ce dernier fluide ; savoir, la difficulté qu'éprouvent ses molécules à se mouvoir dans le fer, et qui provient de la force coercitive (731), et la répulsion qu'exercent sur ces mêmes molécules celles du fluide déjà accumulé vers l'extrémité *m* ; et cette répulsion augmente continuellement, à mesure que l'accumulation va elle-même en croissant. Il peut donc arriver qu'il y ait un terme, où la résistance qui naît du concours de ces deux causes devienne supérieure à la répulsion de la force B′, et alors le fluide s'engorgera, pour ainsi dire, dans quelque point *b′*, en cédant à cette résistance, et il pourra même abonder tellement dans ce point, que son action produise dans la partie voisine *a′* le magnétisme austral.

Le barreau *m n* aura donc, dans ce cas, quatre pôles situés à la suite les uns des autres, et qui auront alternativement le magnétisme austral et le magnétisme boréal. On a donné le nom de *points conséquens* à ces différens pôles qui se succèdent dans un même aimant. Il y a une grande différence entre cette succession de pôles contraires et celle qui résulte de ce que les molécules du fer sont autant de petits aimants dont les pôles en contact ont des forces opposées ; car nous avons vu que ces forces sont équivalentes à une seule force, qui ne varie d'un point à l'autre que par son intensité, au lieu que chaque point conséquent détermine une force réellement con-

traire à celle que manifesterait sans lui la partie dans laquelle il réside.

763. L'action d'un aimant sur une aiguille qui est déjà à l'état de magnétisme, mais qui n'a que deux pôles, à l'ordinaire, peut être assez forte pour faire acquérir un ou deux pôles de plus à cette aiguille, qui alors aura trois ou quatre points conséquens. Elle peut encore produire un autre effet, qui est lié avec le précédent, et d'où résulte un simple renversement des pôles de l'aiguille, de manière que le pôle austral prendra la place du pôle boréal, et réciproquement.

La circonstance qui détermine l'un de ces effets à avoir lieu plutôt que l'autre, dépend du rapport entre la force du barreau et celle de l'aiguille. Supposons que l'aiguille *m n* (*fig.* 81) étant mobile sur son pivot, on la présente par son pôle boréal *b* au pôle boréal B d'un barreau, en la maintenant avec la main, pour l'empêcher de tourner par l'effet de la répulsion. Il pourra arriver que la force B′ du barreau (740) refoule tout le fluide *b* jusqu'à une certaine distance de l'extrémité *n*, et qu'en même temps elle décompose une nouvelle portion du fluide qui est encore à l'état naturel dans l'aiguille, et attire vers *n* le fluide austral qui faisait partie de ce fluide naturel. L'aiguille alors aura trois points conséquens, ainsi qu'on le voit (*fig.* 82), ensorte que si on fait passer successivement vis-à-vis de ses différens points le pôle austral d'une autre aiguille, qui ne soit pas assez forte pour changer l'état de la première, les deux extrémités de celle-ci seront repoussées, et il y aura, entre l'une et l'autre, un point tel que *b* qui sera attiré.

764. Mais si le barreau AB (*fig.* 81) est assez vigoureux pour surmonter dans tous les points de l'aiguille *m n* la résistance de la force coercitive, il pourra se faire qu'il refoule jusqu'en *m* le fluide boréal de l'aiguille, et attire jusqu'en *n* son fluide austral ; et dans ce cas, les pôles de l'aiguille seront renversés sans qu'il y ait aucun pôle intermédiaire entre les extrémités *m*, *n*.

765. L'analogie entre les aimants et les corps susceptibles

de s'électriser par la chaleur, se soutient jusque dans cette espèce d'anomalie que présentent les points conséquens. Nous avons observé une topaze qui, après avoir été chauffée, avait ses deux extrémités à l'état résineux, tandis que la partie intermédiaire donnait des signes d'électricité vitrée (1).

Différences entre l'Acier et le Fer doux, relativement à la communication du Magnétisme.

766. Pour faciliter l'intelligence de ce qui doit suivre, nous rappellerons ici, avec plus de détail, ce que nous avons déjà dit (731) de la différence qu'apporte en général, dans le mouvement interne du fluide, le plus ou moins de dureté du fer. L'acier ne se prête à ce mouvement qu'avec beaucoup de difficulté ; mais aussi dès qu'une fois les deux fluides composans ont franchi les obstacles qui tendaient à les empêcher de se distribuer dans les deux moitiés d'un barreau d'acier, la même difficulté qui avait retardé cette distribution, s'oppose à l'effet de la force attractive, qui tend à ramener les deux fluides l'un vers l'autre, et à faire rentrer, par leur combinaison, le barreau dans son état naturel. Au contraire, dans le fer doux, le dégagement des deux fluides se fait plus facilement et plus abondamment ; mais le retour à l'état de combinaison s'opère ensuite avec la même facilité, d'où il suit que le fer doux acquiert promptement un degré de magnétisme considérable, mais en même temps fugitif, au lieu que l'acier, beaucoup plus difficile à aimanter, conserve aussi plus long-temps sa vertu ; et c'est pour cette raison que les barreaux d'acier sont seuls employés pour faire les aimants artificiels.

(1) Annales du Muséum d'Histoire Naturelle, cinquième cahier, p. 350.

Méthode d'aimanter par un seul Contact.

767. Le procédé le plus simple, pour communiquer le magnétisme à une verge de fer ou d'acier, consiste à frotter cette verge avec un barreau aimanté, dont on fait glisser un des pôles dans toute la longueur de la verge, en répétant plusieurs fois cette opération dans le même sens. Supposons que le pôle en contact avec la verge soit le pôle boréal du barreau : l'action de ce pôle attire le fluide austral de la verge, et repousse le fluide boréal ; d'où il résulte que la partie de la verge en contact avec le barreau tend sans cesse vers l'état de magnétisme austral, et lorsque le barreau est arrivé à l'extrémité et qu'on le retire, la partie qu'il vient de quitter se trouve dans ce même état de magnétisme.

Le barreau, pendant son mouvement, agissait en même temps de part et d'autre, à une certaine distance, pour repousser le fluide boréal ; mais, à mesure qu'il avançait vers l'extrémité qui devait être le terme de son mouvement, il détruisait l'effet de cette action dans les points dont il se rapprochait, et les faisait passer à l'état de magnétisme austral ; d'où il suit qu'à la fin de son mouvement les parties situées jusqu'à une certaine limite, vers l'extrémité qu'il vient de quitter, possèdent le magnétisme austral, et les parties ultérieures, situées vers l'extrémité opposée, ont acquis le magnétisme boréal ; et ainsi, lorsque la verge restera ensuite abandonnée à elle-même, les deux fluides, pour satisfaire aux conditions de l'équilibre, s'y distribueront de manière que toute la moitié sur laquelle le barreau aura passé en dernier lieu, possédera le magnétisme austral, et l'autre moitié le magnétisme boréal.

Si l'on fait une nouvelle friction, toujours dans le même sens, elle agira en partie pour diminuer l'effet de la précédente, et en partie pour l'augmenter ; et tant que le second effet l'emportera sur le premier, la verge continuera d'acquérir. Mais cette augmentation de vertu magnétique sera très-limitée,

de manière qu'après un petit nombre de frictions la communication du magnétisme s'arrêtera.

Méthode du double Contact.

768. La manière d'aimanter inventée par Michelli, et à laquelle on a donné le nom de *méthode du double contact*, est beaucoup plus avantageuse que la précédente. Pour la mettre en pratique, on prend deux barreaux aimantés R, S (*fig.* 83), que l'on dresse verticalement à une petite distance l'un de l'autre, de manière que leurs pôles opposés A, B se correspondent. On les fait glisser, dans cette situation, d'un bout à l'autre de la verge que l'on veut aimanter, de manière qu'ils vont et viennent alternativement, sans leur permettre de dépasser les extrémités de cette verge ; et, lorsqu'après plusieurs frictions les barreaux se retrouvent vers le milieu de la verge, on les enlève suivant leurs directions perpendiculaires à cette verge. Le résultat de cette opération est de mettre chaque extrémité de la verge dans l'état contraire à celui du pôle inférieur du barreau, situé vers cette même extrémité.

769. Pour concevoir l'effet de la méthode dont il s'agit, considérons d'abord ce qui se passe dans la partie de la verge qui répond à l'intervalle entre les centres d'actions a' et b' des pôles inférieurs, les seuls qui influent, d'une manière bien sensible, sur le résultat : il est facile de voir que chacune des molécules de fluide austral, telle que x, renfermée dans cette partie intermédiaire, est attirée, de gauche à droite, par le centre d'action boréal b', et repoussée, dans le même sens, par le centre d'action austral a'. Chaque molécule m de fluide boréal est attirée, au contraire, de droite à gauche par le centre a', et repoussée, dans la même direction, par le centre b'. Ces effets sont contrariés, jusqu'à un certain point, par les actions que les barreaux exercent sur les parties ultérieures ; par exemple, le barreau S repousse vers la droite les molécules de fluide boréal qui sont derrière lui, au lieu qu'il repousse, de droite à gauche, celles qui sont en avant, dans l'intervalle entre les

centres. Mais la première répulsion est détruite, en grande partie, par l'attraction contraire de l'autre barreau R sur les mêmes molécules; ensorte que, tout compensé, l'opération tend sans cesse vers son but, qui est, en général, de produire le magnétisme austral dans toute la moitié de la verge située à droite, et le magnétisme boréal dans la moitié opposée. La précaution que l'on prend d'enlever les barreaux du milieu de la verge, à la fin de l'opération, sert à favoriser la distribution symétrique des fluides dans les deux moitiés de cette verge abandonnée à elle-même.

770. Il se présente ici une considération relative à la distance requise entre les barreaux, pour que leurs actions aient la plus grande influence possible sur l'effet principal, c'est-à-dire, sur celui qui est produit dans l'espace que ces barreaux interceptent. La détermination de cette distance dépend de la quantité dont les centres d'action a', b' sont élevés au-dessus du barreau A'B', qui reçoit le magnétisme. Pour concevoir ceci, supposons que les barreaux étant à une distance quelconque l'un de l'autre, leurs centres d'action se trouvent en a et en b (*fig.* 84), et que A' B' soit toujours le corps qu'il s'agit d'aimanter. Bornons-nous à considérer, pour plus de simplicité, l'action répulsive du centre b sur une molécule m du fluide boréal renfermé dans le barreau A' B'. Cette action étant dirigée obliquement, par rapport à la longueur de ce barreau, qui est le sens suivant lequel le fluide doit être poussé pour arriver en B', elle se décompose en deux autres actions, l'une suivant bp perpendiculaire sur A' B', et qui est nulle par rapport à l'effet proposé; l'autre suivant br, menée parallélement à A'B' jusqu'à la rencontre de mr, perpendiculaire sur la ligne de jonction des centres; et cette seconde force contribue seule au mouvement de la molécule vers B'.

Or, d'une part, la ligne br augmente, à mesure que l'angle bma est plus ouvert, ou, ce qui revient au même, à mesure que les deux barreaux sont plus éloignés l'un de l'autre; mais en même temps l'intensité de l'action de b diminue, à raison d'une plus grande distance entre ce centre et la molécule m.

Supposons cette distance nulle, l'action représentée par *br* s'évanouira ; supposons, au contraire, la distance infinie, l'intensité de la force de *b* deviendra zéro à son tour. Il y a donc, par rapport à l'angle *bma*, une certaine mesure moyenne qui donne, pour la force réelle, la plus grande valeur possible. Æpinus, qui supposait que l'action des forces magnétiques suivait la raison inverse de la simple distance, avait trouvé que l'angle *bma* était droit dans le cas du *maximum;* mais, si l'on rétablit la véritable loi, savoir, celle qui suit la raison inverse du carré de la distance, on aura $70^{d.}\ 31'\ 44''$ pour la valeur de l'angle dont il s'agit (1).

771. Supposons, par exemple, que les barreaux dont on se sert soient dans le même état que le fil d'acier dont nous avons parlé plus haut (755), qui avait $67^{cent.},5$ de longueur, et dans lequel les centres d'action étaient à $22^{mil.},5$ des extrémités ; il faudra, pour obtenir le *maximum* d'action, placer les barreaux à la distance respective de 32 millimètres.

La même Méthode perfectionnée.

772. Æpinus a employé la méthode du double contact par un procédé différent, qui consiste à incliner les barreaux en

---

(1) Représentons la force oblique suivant *bm* par la partie *om* de cette ligne, et menons *og* parallèle à *br*; *og* sera la qoantité dont il faut chercher le *maximum*. Soit $br = x$, et $rm = a$, et soit z en général le nombre qui indique le degré de la puissaoce relative à la loi de l'attraction ou de la répulsion. Nous aurons $om = \frac{1}{(bm)^z}$. De plus, om, ou bien $\frac{1}{(bm)^z} : og :: bm : x$. Donc $og = \frac{x}{(bm)^{z+1}} = \frac{x}{(a^2+x^2)^{\frac{z+1}{2}}}$, quantité dont la différentielle égalée à zéro, donne $x = \pm \frac{a}{\sqrt{z}}$.

Si l'on fait $z = 1$, on a $x = a$, ce qni conduit an résultat d'AEpinus. Si l'on fait $z = 2$, cooformémeot à la véritable loi, on trouve $a : x :: \sqrt{2} : 1$, d'où l'on déduit l'angle dont nous avons parlé.

sens contraire, comme on le voit (*fig.* 85), ensorte que chacun d'eux fasse un petit angle d'environ 15 ou 20 degrés avec le barreau A′ B′. Il se fondait sur ce que l'on gagne deux choses dans cette manière d'opérer : d'abord, les centres d'action a', b', qui étaient élevés d'une certaine quantité au-dessus de la surface du barreau A′ B′, quand les barreaux qui agissaient sur celui-ci avaient une position verticale, se trouvent beaucoup plus près de lui, et leur action en est plus efficace. En second lieu, l'intervalle entre les centres d'action étant considérablement augmenté, en conséquence de l'angle très-ouvert que les barreaux font entre eux, cette nouvelle circonstance recule les limites entre lesquelles était resserré l'effet des forces conspirantes, et seconde d'autant mieux l'activité de ces forces.

773. Mais ces avantages étaient balancés, jusqu'à un certain point, par l'inconvénient qu'avait l'opération de produire souvent, dans le barreau A′ B′, des points conséquens, dont l'action, quoique peu sensible, ne devait cependant pas être négligée, surtout lorsqu'il s'agissait des aiguilles de boussole, dont la perfection tient en partie à l'unité de leurs pôles. Pour concevoir l'inconvénient dont il s'agit, supposons que les barreaux AB, en se mouvant de A′ vers B′, soient parvenus au milieu du barreau A′ B′. Soit *r z* une perpendiculaire abaissée du centre d'action de A sur ce dernier barreau. Une molécule *s* de fluide boréal, située à la droite de cette perpendiculaire, est fortement sollicitée à s'en approcher, en vertu de l'action des deux barreaux AB; mais en même temps une molécule *s′* du même fluide, située à la gauche de la même perpendiculaire, est attirée en sens opposé; et cette action n'est plus sensiblement détruite par la force contraire du centre b', comme dans le cas où les barreaux AB sont situés verticalement. Or, il peut arriver que le fluide *s*,*s′* se soit tellement accumulé dans l'espace qu'il occupe, que lorsqu'ensuite les deux barreaux continueront leur mouvement, la force coercitive du barreau A′ B′ ne leur permette de refouler vers B′ qu'une partie du même fluide. Il se formera donc dans l'espace *ss′* un pôle boréal qui, à son tour, pourra faire naître un pôle austral dans l'espace voisin,

situé vers B′, ce qui introduira dans cet espace une espèce de force perturbatrice, par rapport à celle de l'extrémité B′.

Pour parer à cet inconvénient, Coulomb, après avoir posé les deux barreaux AB sur le milieu du barreau A′B′, en les inclinant comme faisait Æpinus, les tire en sens contraire l'un de l'autre, jusqu'à une petite distance de l'extrémité la plus voisine, puis recommence, en partant toujours du milieu. De cette manière, les forces des centres a' et b' étant plus divisées, sans cesser d'être conspirantes, ne produisent plus ces accumulations de fluide d'où résultent les points conséquens.

Moyen d'aimanter fortement deux Barreaux d'acier.

774. Il est important, pour le succès de l'opération que nous venons de décrire, d'avoir en sa disposition deux barreaux doués d'une puissante vertu magnétique. Or, c'est à l'aide de la méthode elle-même que l'on peut se les procurer. Pour y parvenir, on en prend quatre, égaux et semblables, dont deux au moins doivent avoir un commencement de magnétisme. On dispose les deux autres parallélement entre eux, comme M, N (*fig*, 86), et l'on applique contre leurs extrémités deux parallélipipèdes T, T de fer doux, de manière que l'ensemble présente la figure d'un rectangle. On se sert ensuite des deux barreaux R, S qui sont déjà dans l'état magnétique, pour communiquer la même vertu à l'un des premiers barreaux, tel que M, en employant la méthode d'Æpinus, ou, si on l'aime mieux, celle de Coulomb. Ce barreau acquiert des pôles dont les positions sont indiquées sur la figure, et déjà l'autre barreau N, en vertu de la communication qui s'établit entre lui et le barreau M, par l'intermède des contacts, reçoit lui-même un commencement de magnétisme; et il est facile de concevoir que chacun de ses pôles correspond au pôle contraire du barreau M, comme on le voit encore sur la figure. Après un certain nombre de frictions, on retourne le barreau M, sans changer la disposition de ses pôles, et l'on répète l'opération sur l'autre face. On fait des frictions semblables successivement

sur les deux faces du barreau N, en observant de renverser les positions des pôles des barreaux R, S, parceque ceux du barreau N sont eux-mêmes situés en sens contraire des pôles du barreau M. Cette opération terminée, on substitue les barreaux R, S aux barreaux M, N, et l'on se sert de ces derniers pour augmenter la vertu des autres. Lorsqu'on jugera que la communication du magnétisme est parvenue à son dernier degré, on emploîra de préférence les barreaux qui auront reçu les dernières frictions, pour aimanter des aiguilles d'acier et d'autres corps de la même espèce.

On seconde l'effet de cette opération, en y faisant concourir les deux autres barreaux comme moyens auxiliaires. On dirige alors ces barreaux sur une même ligne, comme on le voit *fig.* 87, à une distance moindre que la longueur de l'aiguille que l'on veut aimanter, et l'on donne à celle-ci une position *ab* qui répond à l'intervalle entre les deux barreaux, de manière qu'elle repose sur eux par ses extrémités.

Si les barreaux M, N (*fig.* 86) avaient déjà un certain degré de magnétisme, il est évident qu'il faudra les placer d'avance dans les positions respectives analogues à celles que représente la figure, où les pôles de différens noms se répondent du même côté.

775. Supposons que, par un moyen quelconque, les barreaux M, N soient maintenus dans une position invariable, par rapport à eux-mêmes et à l'un des contacts T, et qu'ayant suspendu verticalement cet assemblage, de manière que le point d'attache soit du côté du contact fixe, on place à l'endroit de l'autre contact une pièce de fer doux, garnie inférieurement d'un crochet, comme celle qui est en dessous de l'aimant PS (*fig.* 88). On pourra, en suspendant différens corps à ce crochet, évaluer le poids que l'aimant est capable de porter en vertu de sa force attractive. C'est sur ce principe que sont construits les aimants artificiels; toute la différence consiste en ce que l'on substitue aux barreaux M, N (*fig.* 86) deux faisceaux de lames d'acier, que l'on a d'abord aimantées séparément, et que l'on a ensuite réunies de manière que, dans

chaque faisceau, elles fussent contiguës par les pôles de même nom. Coulomb a fait exécuter de ces aimants, qui pesaient environ dix kilogrammes, ou vingt livres, et dont la force était équivalente à un poids d'environ cinquante kilogrammes, ou cent livres (1). Dans les petits aimants, le rapport s'accroît entre le poids de l'assemblage et celui de la charge. Ingen-Housz cite un de ces derniers qui portait plus de cent fois son propre poids, et ajoute que M. Knigt lui avait dit qu'on pouvait aller beaucoup au-delà (2).

Des Armures.

776. Les aimants naturels que l'on soumet à l'expérience dans l'état où ils étaient, en sortant du sein de la terre, ne manifestent communément qu'un médiocre degré de magnétisme, qui est même susceptible de s'affaiblir par succession de temps. On a conçu l'idée heureuse de leur associer des lames de fer doux nommées *armures*, qui étant soumises continuellement à l'action des pôles auxquels elles sont appliquées, exercent sur ceux-ci une réaction capable non-seulement de leur conserver leur vertu, mais même de la faire croître dans un grand rapport.

777. Avant d'armer un aimant, on le taille en parallélipipède rectangle PS (*fig.* 88), de manière que si l'on conçoit un plan qui passe à égale distance de deux faces opposées, parallélement à ces mêmes faces, les deux moitiés interceptées par ce plan seront dans deux états différens de magnétisme, comme celles d'un barreau aimanté. Chaque armure fh ou $f'h'$, a la forme d'une équerre dont une des branches f, f', qui est plus longue que l'autre, et que l'on nomme *la jambe* de l'armure, s'applique contre une des faces dont nous venons de parler ; et l'autre branche h, h', qui est *le pied* de l'armure, s'applique

(1) Mémoires de l'Académie des Sciences; 1789, p. 505.

(2) Nouv. Expér. et Observ. sur divers objets de Physique, t. I, p. 329.

contre

contre la face adjacente, que l'on peut considérer comme la base du parallélipipède. L'armure ne recouvre cette base que sur un espace de quelques millimètres de longueur.

778. Analysons maintenant l'effet de l'armure qui répond, par exemple, au pôle B de l'aimant. La force de ce pôle agit pour décomposer le fluide naturel de l'armure; elle attire le fluide austral dans les parties de l'épaisseur de l'armure les plus voisines de l'aimant, et repousse le fluide boréal dans les parties les plus éloignées; et comme elle agit beaucoup plus efficacement sur la jambe *f*, le fluide austral se portera de préférence dans l'épaisseur de celle-ci, et le fluide boréal sera refoulé en grande partie dans le pied *h*, tant par l'action de l'aimant, que par la force répulsive mutuelle de ses propres molécules.

Le pied de l'armure acquerra donc l'espèce de magnétisme qui existe dans la partie correspondante de l'aimant, c'est-à-dire, le magnétisme boréal. On prouvera, par un raisonnement semblable, que les effets contraires ont lieu relativement à l'autre armure.

Or la jambe agit à son tour par un magnétisme austral, sur le pôle boréal de l'aimant, pour y attirer de nouveau fluide, et cet effet n'est que faiblement balancé par l'action opposée du pied de l'armure, qui est à une plus grande distance. Par une suite nécessaire, le pied acquerra un surcroît de force, et c'est en général de cette combinaison d'actions réciproques que dépend l'avantage qu'ont les armures, d'ajouter un nouveau degré d'activité à la force que les aimants ont reçue de la nature.

779. La jambe de l'armure doit être d'une certaine épaisseur, que l'on ne pourrait ni diminuer ni augmenter sans inconvénient; car si elle se trouvait tellement mince, que le pôle adjacent de l'aimant fût capable d'y attirer une nouvelle quantité de fluide, dans le cas où elle serait plus épaisse, elle ne produirait pas tout son effet. D'une autre part, si son épaisseur excédait de beaucoup la limite jusqu'à laquelle peut s'étendre le fluide attiré par le pôle voisin, l'autre fluide re-

poussé par le même pôle, passant en partie dans le reste de l'épaisseur, y produirait un magnétisme semblable à celui du même pôle, et dont la réaction sur ce pôle s'opposerait à l'effet principal. Il y a donc un certain degré d'épaisseur qui donne, relativement à la jambe de l'armure, le *maximum* de magnétisme contraire à celui du pôle adjacent, et pour le pied, le *maximum* de magnétisme semblable à celui du même pôle. L'artiste qui veut diriger la construction de l'armure vers la plus grande perfection de l'aimant, doit chercher ce degré, auquel on ne peut arriver que par tâtonnement.

5. Du Magnétisme du Globe terrestre.

780. Les phénomènes naturels du magnétisme, comparés à ceux de l'électricité, présentent une des différences les plus tranchées entre les modifications des fluides qui produisent ces deux classes de phénomènes, liés à d'autres égards par des analogies si marquées. Ceux qui appartiennent à l'électricité ne sont bien sensibles que dans des circonstances locales et variables, et prennent ordinairement naissance au milieu des météores, qui n'ont eux-mêmes qu'une existence passagère. Le magnétisme exerce une action universelle et durable, qui se rapporte à des points déterminés, qui ne varie que par un progrès lent et gradué, et qui a son siége dans le globe même que nous habitons. Il est devenu, par sa généralité, un sujet inépuisable d'observations qui se répètent dans toutes les parties des mers; pour lui, tous les navigateurs sont physiciens, et ne cessent de fixer un œil attentif sur cette aiguille que sa présence semble animer, et qui est capable de leur servir de guide jusque dans les pays les plus reculés.

Déclinaison de l'Aiguille aimantée.

781. Avant de faire connaître les opinions des physiciens sur la cause du magnétisme naturel, nous allons exposer ce que l'on

a observé par rapport à la position de l'aiguille aimantée. Lorsqu'on dit de cette aiguille qu'elle tourne une de ses extrémités vers le Nord, quand elle est librement suspendue, cela n'est vrai que dans un sens général et qui admet un grand nombre de restrictions. Si l'on porte l'aiguille successivement à différens points du globe, il y en aura quelques-uns où sa direction coincidera exactement avec une ligne tirée du Midi au Nord, ou avec le méridien du lieu. Mais dans d'autres points, elle s'écartera de cette ligne, tantôt vers l'Orient, tantôt vers l'Occident, et la quantité de l'écartement variera suivant les lieux. On a donné à cette déviation le nom de *déclinaison*.

Pour mesurer la déclinaison, on suppose un plan vertical qui passe par la direction de l'aiguille. Le cercle qui coincide avec ce plan, s'appelle *méridien magnétique* (735), et l'angle formé par ce méridien avec le méridien terrestre qui appartient au même lieu, est l'*angle de déclinaison*.

Inclinaison.

782. L'aiguille est sujette à une autre espèce de déviation. Supposons qu'étant en équilibre sur son pivot, avant d'être aimantée, elle se trouvât située dans un plan exactement parallèle à l'horizon : dès qu'elle aura reçu la vertu magnetique, elle prendra une position plus ou moins inclinée par rapport à ce plan, excepté à certains endroits de la terre. On a donné à cette seconde déviation le nom d'*inclinaison*.

Variations dans la Déclinaison.

783. Si l'on part de l'un des endroits où la déclinaison est nulle, et qu'on s'avance vers le Nord ou vers le Sud, on pourra passer par une suite de points où elle sera pareillement nulle ; mais ces points ne se trouveront pas sur un meme méridien : ils formeront une courbe irrégulière, qui aura des inflexions en différens sens.

784. Halley est un des premiers qui ait entrepris de tracer, sur une mappemonde, ces suites de points où la déclinaison est zéro, et que l'on a appelées *bandes sans déclinaison.*

On a observé jusqu'ici trois bandes sans déclinaison, qui ont été suivies par les marins jusqu'à des latitudes plus ou moins considérables.

785. Mais de plus, la déclinaison varie avec le temps dans un même lieu, et ses variations ne croissent point dans le même rapport que le temps; ensorte que les bandes sans déclinaison changent continuellement et de position, et de figure. A Paris, la déclinaison était nulle en 1666; le 12 floréal, an 10, c'est-à-dire, 136 ans après cette première époque, Bouvard l'a trouvée de $22^{d.}$ 3′ vers l'Ouest.

786. Il arrive aussi quelquefois que la déclinaison subit des interruptions, ensorte que l'aiguille reste sensiblement stationnaire pendant un certain temps : par exemple, l'aiguille ne fit aucun mouvement, à Paris, depuis 1720 jusqu'en 1724, et durant cet intervalle, elle se tint constamment à $13^{d.}$ du méridien.

787. L'observation prouve encore que les variations de la déclinaison comparées entre elles, à divers points du globe, suivent des rapports différens. Mais un fait très-digne d'attention, est celui qui a été remarqué par le célèbre Hallé, à la simple inspection de la table de déclinaison publiée par Van-Swinden, auquel ce même fait avait échappé. Dans cette table, on distingue trois endroits où l'aiguille a subi les plus grandes déclinaisons, et qui sont situés, 1°. au milieu de la mer des Indes, à 10 et $15^{d.}$ de latitude méridionale, et à $82^{d.}$ et $87^{d.}$ de longitude orientale, en partant de l'île de Fer : dans cet endroit, la variation a été de $11^{d.}$ à $11^{d.}$ 15′ depuis 1700 jusqu'à 1756; 2°. dans l'Océan Ethiopique, depuis $5^{d.}$ de latitude septentrionale jusqu'à $20^{d.}$ ou $25^{d.}$ de latitude méridionale, et dans l'intervalle de 10, 15 et $20^{d.}$ de longitude orientale; la variation relative à cette localité a été, entre les mêmes époques, de $10^{d.}$ à $10^{d.}$ 45′, principalement sous la ligne et dans l'étendue de $5^{d.}$ vers le Sud; 3°. à $50^{d.}$ de latitude septentrio-

nale, et entre 17$^{d.}$ de longitude orientale et 10$^{d.}$ de longitude occidentale. On a eu, dans cet endroit, pendant le même espace de temps, une variation de 11$^{d.}$ à 11$^{d.}$ 45′.

Or en considérant, sur la table de Van-Swinden, les trois endroits dont il s'agit, Hallé a trouvé qu'ils formaient comme trois centres autour desquels les nombres qui indiquent les quantités de la variation décroissent insensiblement, à mesure qu'on s'éloigne de chacun des mêmes centres ; de manière qu'il en résulte un nouvel ordre d'observations, qui correspond aux lieux où la variation a été la plus faible, pendant le même cours d'années.

Ces lieux sont : 1°. toute la mer d'Amérique, sans y comprendre le golfe du Mexique, c'est-à-dire, en allant de la pointe orientale de l'Afrique, jusqu'à la hauteur de l'île Bermude. Il faut encore remarquer ici que dans l'Océan, situé entre l'Afrique et l'Amérique méridionale, la grandeur des variations est beaucoup moindre vers les côtes de l'Amérique, que vers celles de l'Afrique ; 2°. les environs de l'île de Madagascar, et une partie de la côte de Zanguebar ; 3°. la partie de mer qui est au Sud et au Sud-Est des îles de la Sonde, entre celles-ci et la Nouvelle Hollande ; 4°. enfin, dans la même mer, vers le 4e degré de latitude méridionale, et le 97e degré de longitude orientale, c'est-à-dire, au milieu de l'espace compris entre l'angle occidental de la Nouvelle Hollande et la pointe méridionale de l'Afrique. Dans tous ces divers lieux, les variations qu'a subies la déclinaison de l'aiguille aimantée, pendant les 66 années dont il s'agit, n'ont pas été en tout à un degré (1).

Si des observations du même genre avaient été faites également dans la Mer Pacifique, dans les mers du Nord, dans les mers Australes, et même dans les principales divisions des grandes mers, comme la Baltique, la Méditerranée, le golfe du Mexique, etc., elles auraient offert probablement de semblables points ; et l'on sent de quel intérêt serait pour l'étude

(1) Encyclopédie Méthodique ; Médecine, deuxième partie, t. I, p. 418.

du magnétisme naturel un ensemble de faits subordonnés à un certain nombre de centres, autour desquels ils viendraient se ranger suivant l'ordre de leurs rapports.

788. L'aiguille aimantée est sujette de plus, dans certains endroits, à une variation diurne particulière, dont la marche a été suivie par Van-Swinden, avec l'attention et la constance qui caractérisent cet excellent observateur. Telle est, en général, la loi de cette variation, que l'aiguille s'avance vers l'Ouest le matin, jusque vers midi, ou peu après midi, pour reculer ensuite vers l'Est dans la soirée.

Ce double mouvement est sujet à quatre modifications. La première a lieu lorsque l'aiguille s'avance progressivement, dans toute la matinée, vers l'Ouest, jusqu'au *maximum*, et revient ensuite, par un seul trajet, vers l'Est pendant la soirée, en achevant une période unique représentée par O, E. Dans la seconde modification, l'aiguille s'approche d'abord un peu de l'Est, le matin; et à ce petit mouvement succède la période ordinaire, ensorte que sa marche est alors représentée par *e*, O, E. La troisième modification est celle où la période ordinaire est suivie, vers la fin de la soirée, d'un petit mouvement vers l'Ouest, ce qui donne pour l'expression du mouvement total, O, E, o. Enfin, la quatrième modification participe de la seconde et de la troisième, et son expression est *e*, O, E, o (1). L'aiguille fait donc ainsi continuellement de petites oscillations, dont tel est le résultat général, que la somme des mouvemens qui ont lieu vers l'Ouest l'emporte sur celle des mouvemens en sens contraire, de manière que la déclinaison va en augmentant du même côté.

789. Ce n'est pas tout encore, et ces variations qui, au milieu de leur inconstance, ont, jusqu'à un certain point, une marche suivie et réglée, sont sujettes à des espèces d'anomalies subites et fugitives, qui portent visiblement le caractère d'une cause perturbatrice. Aussi les marins ont-ils désigné ces anoma-

(1) Recueil de Mémoires sur l'Analogie de l'Electricité et du Magnétisme, par Van-Swinden, t. III, p. 4 et suiv.

lies sous le nom d'*affollemens*, et lorsqu'ils les apperçoivent, ils disent que l'aiguille est *affollée* (1). On a remarqué que l'aiguille est quelquefois agitée par un temps d'orage, et souvent, lorsqu'il paraît une aurore boréale (2). Mais on n'a point déterminé jusqu'ici l'influence immédiate de ces phénomènes, considérés comme causes des affollemens de l'aiguille.

Variations dans l'Inclinaison.

790. L'inclinaison de l'aiguille a aussi ses variations, qui sont surtout sensibles lorsqu'on change de latitude. Elle est nulle à peu près à l'équateur, de manière que tous les points où l'aiguille est exactement parallèle à l'horizon, forment une courbe qui coupe l'équateur sous de petits angles, et à laquelle on a donné le nom d'*équateur magnétique*. A mesure que l'on s'écarte de cette courbe, en allant vers un pôle ou vers l'autre, l'inclinaison va en augmentant, desorte que l'extrémité de l'aiguille qui regarde le pôle voisin s'abaisse continuellement en dessous de sa première position. La plus grande inclinaison dont on ait encore parlé est de $82^{d.}$, et a été observée par Phipps à $79^{d.}$ $44'$ de latitude méridionale, et $131^{d.}$ de longitude. L'inclinaison était, à Paris, de $71^{d.}$ en 1787; elle varie aussi avec le temps dans un lieu donné. On en corrige l'effet, au moins pour un certain nombre d'années et relativement à un même point du globe, en rendant inégaux les poids des deux moitiés de l'aiguille, dans le rapport nécessaire pour que la force qui tire par en bas un des côtés de cette aiguille, soit compensée par l'excès de pesanteur de la partie opposée, de manière que l'aiguille prenne une position horizontale.

---

(1) Recueil de Mémoires sur l'Analogie de l'Electricité et du Magnétisme, par Van-Swinden, t. III, p. 2 et suiv.

(2) *Même ouvrage*, t. I, p. 466, et t. III, p. 187 et suiv.

Variations dans l'Intensité des Forces qui agissent sur l'Aiguille.

791. Outre ces deux grandes classes de phénomènes, dont les uns appartiennent à la déclinaison et les autres à l'inclinaison, il en est une troisième qui comprend les variations que subit l'intensité des forces magnétiques qui sollicitent l'aiguille, suivant la diversité de ses positions relativement au globe terrestre. Les observations du célèbre Humbolt ont dévoilé, à cet égard, un fait très-remarquable, qui consiste dans l'accroissement que prend cette intensité des forces magnétiques, en allant de l'équateur vers les pôles (1).

M. Humbolt, avant de partir de Paris pour le grand voyage dont il a rapporté une récolte de connaissances relatives à la Physique non moins précieuse que celle dont l'histoire naturelle lui est redevable, avait soumis à l'expérience une boussole qui donnait 245 oscillations en dix minutes. La même boussole n'en a plus donné que 211 au Pérou, pendant un temps égal, et la marche générale de ses oscillations a toujours varié de la même manière, ensorte que leur nombre diminuait ou augmentait, suivant que l'on s'approchait de l'équateur ou qu'on s'en éloignait.

M. Humbolt a souvent fait osciller l'aiguille dans deux plans différens, savoir, dans celui du méridien magnétique du lieu, et dans un plan perpendiculaire à ce méridien. D'une autre part, il avait observé chaque fois l'inclinaison de l'aiguille. Depuis le retour de ce savant voyageur, M. de Laplace a proposé un moyen de déterminer, à l'aide du calcul, l'inclinaison de l'aiguille, en partant des observations relatives à l'oscillation. Il suffit pour cela de décomposer la force qui a lieu dans le sens perpendiculaire au méridien magnétique, et de comparer la

(1) Mémoires de MM. Humbolt et Biot, sur les variations du Magnétisme terrestre à différentes latitudes; Journal de Physique, frimaire an XIII, p. 249 et suiv.

partie de cette force dont l'action s'exerce sur l'aiguille, avec la force totale relative au plan dont nous venons de parler. On a ainsi deux données qui conduisent à la solution du problème. Or, la conformité qui règne entre l'inclinaison calculée et celle qui a été trouvée directement, garantit la justesse des observations de M. Humbolt sur l'intensité des forces magnétiques.

792. Les actions de ces forces ne s'étendent pas seulement à tous les points de la surface du globe terrestre ; elles se propagent encore dans l'espace environnant ; et des expériences récentes faites par des observateurs aussi éclairés qu'attentifs démontrent le peu de fondement de l'opinion émise par quelques physiciens, que l'intensité des forces magnétiques devenait insensible à une certaine hauteur au-dessus de la surface du globe. Dans le voyage aérostatique entrepris par MM. Biot et Gay-Lussac (466), ces deux savans ont trouvé que le nombre d'oscillations faites par l'aiguille aimantée, au haut des airs, dans un temps donné, ne différait pas sensiblement de celui qui avait eu lieu à la surface de la terre. Ce résultat a été confirmé depuis, dans un nouveau voyage où M. Gay-Lussac était seul, et où il est parvenu à une élévation de $7016^{mèt.}$ ou 3600^{toises} au-dessus du niveau de la mer, c'est-à-dire, au point le plus haut que l'homme eût encore atteint, en voyageant soit sur les montagnes, soit dans les régions aériennes. Une aiguille aimantée faisait alors à peu près 10 oscillations en 42 secondes, comme avant le départ de l'observateur (1). Ainsi, tout nous porte à croire que la force magnétique se répand indéfiniment dans l'espace, et sans doute elle y subit des décroissémens qui deviendraient sensibles à un certain terme, s'il nous était donné d'y arriver.

(1) Journal de Physique; frimaire an XIII, p. 457.

Recherches de Biot sur les positions des centres d'Action Magnétique du Globe.

793. Tout ce qui précède confirme de plus en plus l'idée qui s'était offerte depuis long-temps aux physiciens, savoir, que le globe fait la fonction d'un véritable aimant ; et les variations que subit l'aiguille, surtout relativement à son inclinaison qui a lieu dans des sens opposés, sur les espaces compris entre l'équateur magnétique et les pôles, indiquaient l'existence de deux centres d'action situés de part et d'autre du centre de cet équateur. Mais cette idée une fois admise, combien de recherches laborieuses et délicates il restait à faire, pour la suivre dans ses applications aux différens phénomènes du magnétisme, pour saisir, au milieu de tous ces dérangemens qui compliquent la marche de l'aiguille aimantée, des lois susceptibles d'être exprimées à l'aide du calcul ; enfin pour démêler les circonstances où les actions de ces lois se montrent dans toute leur pureté, de celles où les influences de diverses causes particulières, en se mêlant avec ces mêmes actions, les modifient par des espèces de perturbations locales et passagères ?

Le travail entrepris par le célèbre Biot relativement aux variations du magnétisme terrestre a fait faire un pas important à la science sur la route qui doit conduire à ce but. Parmi les variations dont il s'agit, ce savant s'est borné, quant à présent, à considérer celles que présente l'inclinaisou, qui paraît être le plus constant des phénomènes magnétiques, et celui qui éprouve le moins d'anomalies.

794 L'objet de ses recherches était de déterminer les points dans lesquels il fallait supposer que les deux centres d'action du globe fussent placés, pour que l'inclinaison qui en résulterait fût sensiblement égale à celle que donnait l'observation. Ce problème résolu par rapport à différens points situés convenablement sur la surface du globe, devait conduire à découvrir la loi que suit l'inclinaison dans son accroissement, à mesure que l'on s'avance vers un pôle ou vers l'autre.

795. On avait déjà une donnée essentielle à la solution du problème, dans la connaissance du rapport en raison inverse du carré de la distance, auquel sont soumises, comme nous l'avons vu (732), les actions magnétiques. Mais il fallait encore avoir déterminé avec précision la position de l'équateur magnétique qui est comme la limite entre les inclinaisons qui ont lieu en sens contraire, vers le nord et vers le midi. M. Biot, en comparant deux observations, l'une de M. Lapeyrouse, l'autre de M. Humbolt, dans des points où ces deux savans ont trouvé l'inclinaison nulle, et en supposant, ce qui est très-probable, que l'équateur magnétique soit un grand cercle de la sphère terrestre, a trouvé, par la trigonométrie sphérique, que l'inclinaison de l'équateur magnétique sur l'équateur terrestre est de $10^{d.}\ 58'\ 56''$, que son nœud occidental est, sur ce dernier équateur, à $120^{d.}\ 2'\ 5''$ à l'occident de Paris, c'est-à-dire près des îles Gallipagos, dans la mer du sud, d'où il suit que son nœud oriental est à $59^{d.}\ 57'\ 55''$ à l'orient de Paris, ce qui le place dans la mer des Indes.

796. Pour mieux faire concevoir le résultat auquel ce savant géomètre est parvenu, supposons d'abord un fil magnétique OL (*fig.* 89), qui ait ses deux centres d'action en B et en A, et imaginons que l'on place au-dessus de ce fil une aiguille aimantée *ab*, suspendue librement. D'après ce qui a été dit plus haut (747), telle sera la direction que prendra cette aiguille, qu'elle coincidera avec un plan vertical qui passerait par l'axe du fil magnétique. De plus, dans le cas représenté par la figure, l'aiguille s'inclinera par son pôle austral *a* vers l'extrémité O du fil magnétique, la plus voisine du pôle boréal B de ce fil.

797. Considérons maintenant les actions que le fil exerce sur l'aiguille, pour produire cette inclinaison, et bornons-nous à celles qui ont lieu l'une par rapport à une molécule de fluide anstral située en *a*, et l'autre à l'égard d'une molécule de fluide boréal située en *b*. La première est attirée dans le sens *a*B par le pôle boréal B, et repoussée suivant A*a* par le pôle austral A. Représentons la quantité de l'attraction

par *as*, et celle de la répulsion par *ar* située sur le prolongement de A*a*, puis terminons le parallélogramme *arks*; la molécule tend, en vertu des deux forces qui la sollicitent, à se mouvoir suivant la diagonale *ak* de ce parallélogramme. A l'aide d'une construction semblable, nous pourrons représenter l'attraction que le pôle A exerce sur la molécule boréale située en *b*, par une certaine partie *bx* de la ligne *b*A, et la répulsion du pôle B par *bg* prise convenablement sur le prolongement de B*b*. Donc, si nous complétons de même le parallélogramme *bghx*, le mouvement de la molécule de fluide boréal se fera suivant la diagonale *bh*, qui différera sensiblement de l'autre diagonale *ak*, soit par sa direction, soit par sa longueur, et l'inclinaison de l'aiguille passera par la résultante commune des deux diagonales.

798. Ce que nous venons de dire suppose que la longueur de l'aiguille ait un rapport appréciable avec celle du fil OL, comme cela a lieu dans les expériences magnétiques ordinaires. Mais si nous voulons maintenant ramener le système d'actions que présentent les expériences dont il s'agit, à celui qui résulte du magnétisme naturel, nous devons concevoir que ces actions s'exercent à des distances presque infinies en comparaison de celle qui existe entre les deux pôles *a* et *b* d'une aiguille magnétique, ensorte que les deux lignes B*a*, B*b*, ou A*a*, A*b*, qui représentent les directions des forces d'un même pôle B ou A sont censées se confondre; par une suite nécessaire, on a $bg = as$, et $bx = ar$.

Cela posé, soit GPK (*fig.* 90, Pl. 6), la circonférence d'un des méridiens magnétiques, GK l'axe de l'équateur magnétique, et B, A, les deux centres d'action du globe situés sur cet axe à des distances égales du milieu C. Une aiguille placée dans un point z voisin de la surface du globe, ayant une longueur presque infiniment petite à proportion de sa distance à chaque centre d'action B ou A, l'effet des forces exercées par ces centres pour diriger l'aiguille sera le même que si toutes les molécules australes et toutes les molécules boréales du fluide de cette aiguille étaient concentrées dans deux points *a*, *b*,

contigus en *z*. Or, dans cette hypothèse, les diagonales *ak* et *bk*, dont l'une représente le mouvement du fluide austral de l'aiguille, et l'autre celui de son fluide boréal, sont égales et situées sur une même direction ; et il est visible que cette direction est celle que prendrait une aiguille magnétique suspendue librement. Il suffit donc, pour la déterminer, d'avoir la résultante des deux forces qui s'exercent suivant Bz et Az sur une seule molécule de fluide soit boréal, soit austral.

799. Soit toujours *gk* (*fig.* 91) l'axe de l'équateur magnétique. Supposons que l'aiguille ait une position *ab* parallèle à celle de cet axe. Les deux centres d'action qui sollicitent l'aiguille étant censés égaux en force, et placés à des distances égales du centre *c*, si par le point z on mène un rayon *zc*, il est évident qu'il sera perpendiculaire sur l'axe *gk*. Donc cet axe coincide avec l'horizon du spectateur placé en z. Donc toutes les fois que la position de l'aiguille est parallèle à l'horizon du lieu, le point *z* est un des points de l'équateur magnétique, et il suffit d'avoir observé deux de ces points dans lesquels l'inclinaison est nulle, et de connaître leurs latitudes, pour être en état de déterminer, ainsi que l'a fait M. Biot, la position de l'équateur magnétique, considéré comme un grand cercle de la sphère, et de fixer ses deux points d'intersection avec l'équateur terrestre.

Si l'aiguille s'écarte de l'équateur magnétique, en allant par exemple de z en *z'*, elle ne se dirigera plus suivant *a' b'* parallèle à *gk*, mais suivant une ligne *a'' b''*, qui fera des angles différens avec *gk* et avec l'horizon *rs* du spectateur.

Maintenant, la position du point *z* (*fig.* 90), ou sa distance aux extrémités G, K de l'équateur magnétique étant connue par l'observation, M. Biot, en supposant toujours que les deux centres d'action étaient égaux en force et situés à égale distance du centre C, a de plus considéré le globe comme ayant une figure sphérique. Il avait l'avantage de pouvoir consulter une suite d'observations faites avec beaucoup de soin par M. Humbolt sur l'inclinaison de l'aiguille à différens points du globe. Il a donc cherché, par le calcul, celle que

devait prendre l'aiguille, à chacun de ces mêmes points, en partant de l'hypothèse que les centres d'action coïncidassent avec les points G, K, puis en les rapprochant successivement vers le centre. La première position donnait des inclinaisons beaucoup plus fortes que celles qui avaient été choisies pour termes de comparaison. A mesure que la distance supposée entre les deux centres d'action allait en diminuant, les résultats déterminés par le calcul tendaient toujours davantage vers l'égalité avec les résultats offerts par l'observation, et M. Biot a été conduit par degrés à cette conséquence inattendue, que le terme où les deux résultats s'accordaient le mieux, était en même temps celui des hypothèses, c'est-à-dire que, pour obtenir la plus grande conformité entre ces résultats, il fallait supposer les deux centres d'actions B, A, à une distance presque infiniment petite du centre C, et les regarder, suivant l'expression de M. Biot, comme placés, en quelque sorte, dans une même molécule.

800. On peut entrevoir, à l'aide du simple raisonnement, pourquoi tous les autres résultats fondés snr la supposition que les centres d'action fussent à des distances plus ou moins considérables du centre C, ont dû donner des inclinaisons plus grandes que celles qui étaient relatives au *minimum* de distance entre les mêmes centres, et qui se trouvaient d'accord avec les véritables. Car, en général, les distances Bz, Az (*fig.* 90) anxquelles agissent les deux centres d'action, diffèrent de plus en plus l'une de l'autre, à mesure que le point z s'avance vers le pôle G, d'où il suit que la différence entre les deux forces représentées par *as*, *ar*, reçoit des accroissemens proportionnels. Mais, lorsque les denx centres d'action laissent entre eux un intervalle très-sensible, la différence dont il s'agit, ou, ce qui revient au même, la quantité dont *as* l'emporte sur *ar* est nécessairement plus grande que dans le cas où les mêmes centres étant très-voisins l'un de l'autre, agissent à des distances presque égales. Or, cette supériorité de la force représentée par *as* sur celle qui l'est par *ar*, tend à diminuer l'angle *kas*, et parconséquent à augmenter

l'inclinaison de l'aiguille, dont la direction coincide avec la diagonale *ak*. Au contraire, lorsque les centres B, A, sont presque contigus, *ar* diffère très-peu de *as*, quoique ces lignes conservent toujours entre elles un rapport fini, ce qui tend à relever la position de la ligne *ak*, ou, ce qui revient au même, à diminuer l'inclinaison de l'aiguille.

801. M. Biot, en réunissant aux observations de M. Humbolt celles qui ont été faites par d'autres voyageurs, en a composé un tableau qui présente les résultats de ses propres calculs comparés à ceux des observations dont il s'agit, et l'accord des uns avec les autres n'est altéré que par des différences assez petites, pour ne laisser aucun doute sur la justesse de l'hypothèse que nous venons de développer. M. Biot pense que l'on pourra un jour atténuer ces différences, d'après des connaissances plus certaines sur la position de l'équateur magnétique qu'il ne se flatte pas d'avoir déterminée avec une entière exactitude. Il ne prétend pas même qu'il soit possible de représenter rigoureusement, à l'aide d'une formule générale, toutes les inclinaisons observées. Elles doivent offrir, dans quelques lieux, des anomalies dues à de petits systèmes particuliers d'actions magnétiques, qui modifient les phénomènes généraux. M. Biot cite plusieurs circonstances, dans lesquelles la variation irrégulière de l'aiguille s'expliquait comme d'elle-même d'après le seul aspect du terrain, où se trouvaient des masses de basalte abondantes en fer magnétique. Nous verrons dans la suite que cette hypothèse que M. Biot a la modestie de ne donner que pour une expression géométrique de la loi que suit l'inclinaison, est liée à une manière très-plausible d'envisager les phénomènes sous le rapport de la Physique.

Egalité des Forces qui tirent en sens contraire une Aiguille aimantée.

L'étude du magnétisme naturel a conduit encore les physiciens à d'autres résultats d'observations, qui étant constam-

ment les mêmes, dans tous les lieux, ont été pris pour principes, et dont on a fait des applications utiles, surtout dans la construction des boussoles. Parmi ces résultats, nous en choisirons trois qui sont trop remarquables, pour être passés sous silence.

802. Lorsqu'une aiguille aimantée est suspendue librement à un fil, son pôle austral est tiré vers le Nord, tandis que son pôle boréal est tiré en sens contraire vers le Midi ; et il est évident que dans le cas où les deux forces qui agissent sur cette aiguille varieraient par leur intensité, leur résultante étant toujours sur une seule ligne droite, l'aiguille resterait constamment sur cette même ligne. Mais de plus, l'observation prouve que les deux actions qui tirent l'aiguille dans deux sens opposés sont sensiblement égales, quel que soit le point de la terre où se trouve l'aiguille. C'est la conséquence nécessaire d'une expérience de Bouguer qui, ayant suspendu à un fil, par le milieu, une aiguille non aimantée, auquel cas la direction du fil était verticale, puis ayant aimanté l'aiguille, observa que le fil conservait son aplomb. Coulomb a tiré la même induction, de ce que le poids d'une aiguille aimantée restait le même qu'avant l'opération qui avait produit le magnétisme. On voit effectivement, que si l'une des deux actions l'emportait sur l'autre, son excès pourrait être considéré comme une force particulière dont la direction faisant un angle avec celle de la pesanteur, déterminerait un mouvement composé, ensorte que l'aiguille n'exercerait pas sur la balance la même pression que quand elle n'était pas encore aimantée.

803. La raison de cet effet est facile à saisir d'après ce que nous avons dit plus haut (798), que les pôles magnétiques B, A, du globe terrestre étant censés agir sur une aiguille placée en *z* (*fig.* 90), à des distances qui sont comme infinies relativement à la longueur de cette aiguille, les diagonales *ak* et *bh* dont la première représente le mouvement du fluide austral de l'aiguille et la seconde le mouvement en sens contraire du fluide boréal, sont égales et situées sur une même direction. Car il suit de là évidemment que l'aiguille, dont la position coincide avec la ligne *kh*, a ses deux pôles également tirés en sens opposé.

Force

Force directrice de l'Aiguille.

804. Maintenant, pour faire concevoir en quoi consiste le second résultat, supposons qu'ayant dérangé une aiguille de la position qu'elle avait dans son méridien magnétique, on l'abandonne ensuite à elle-même; elle tendra aussitôt à reprendre sa première position, et cette tendance sera l'effet des différentes forces qui, à ce moment, agissent dans des sens obliques à la longueur de l'aiguille. Or, on peut, en les supposant décomposées, leur substituer une seule force perpendiculaire à l'aiguille, et appliquée à un point situé entre le milieu de cette aiguille et l'extrémité qui regarde le pôle dont elle est plus voisine. Cette force est ce qu'on appelle la *force directrice de l'aiguille*, et l'observation fait voir qu'elle est proportionnelle au sinus de l'angle que fait l'aiguille dérangée de sa direction naturelle avec cette direction elle-même.

805. Coulomb est parvenu à ce résultat par un moyen analogue à celui qu'il avait employé pour déterminer la force électrique mise en équilibre avec la force de torsion d'un fil métallique très-délié (534). Nous rappellerons ici que, toutes choses égales d'ailleurs, la force de torsion est proportionnelle à l'angle de torsion, ou au nombre de degrés que parcourt un point quelconque pris sur la surface du fil, tandis que l'on tord celui-ci. Cela posé, l'aiguille étant d'abord librement snspendue à un fil métallique exempt de toute torsion, Coulomb imprime à ce fil une torsion d'un certain nombre de degrés; alors l'aiguille s'écarte de son méridien magnétique, jusqu'à ce que la force directrice qui tend à l'y ramener soit en équilibre avec la force de torsion. L'observateur mesure l'angle que fait alors l'aiguille avec sa première direction, puis il augmente la torsion d'un certain nombre de degrés. L'aiguille, dans ce cas, s'écarte encore davantage de son méridien magnétique, et en même temps la force directrice qui tend à l'y faire revenir se trouve augmentée, parceque les forces dont elle est la résultante agissent suivant des directions moins obliques à la longueur de

l'aiguille. La torsion terminée, l'aiguille prend de nouveau la position sous laquelle sa force directrice se trouve encore en équilibre avec la force de torsion, qui est mesnrée par la première torsion, plus l'accroissement qu'elle a reçu. Or, on trouve que les nombres de degrés qui mesurent les deux torsions, sont proportionnels aux angles que faisait l'aiguille avec sa première direction, dans les deux positions qui ont donné l'équilibre.

806. Le troisième résultat n'est qu'un corollaire du précédent. Quelles que soient les directions des forces réelles qui agissent sur les différens points d'une aiguille, pour la ramener à son méridien magnétique lorsqu'elle en a été écartée, on peut toujours supposer à ces forces une résultante parallèle au méridien magnétique ; et il est facile de concevoir que cette résultante doit passer par un point placé dans la moitié de l'aiguille qui répond au pôle Nord du globe, si l'expérience se fait dans une des contrées boréales, ou au pôle Sud, dans le cas contraire. Or, en partant du fait que les forces directrices sont proportionnelles aux sinus des angles d'écartement, on trouve que la résultante, dont nous venons de parler, est une quantité constante, qui passe toujours par un même point de l'aiguille.

807. Il est facile de pronver la justesse de cette conséquence. Supposons que *nck* (*fig.* 92), étant la direction de l'aiguille située dans son méridien magnétique, une force quelconque ait fait prendre à cette aiguille la direction *lcf*; la force directrice peut être considérée comme une puissance appliquée à l'extrémité *f* du lévier *cf*. Représentons-la par *fz* perpendiculaire sur *cf*; si, par le point *f*, nous menons *fd* parallèle à *nk*, la résultante de toutes les forces qni agissent sur l'aiguille, estimée parallélement au méridien magnétique, coincidera avec *fd*. Menons par le point *z* la ligne *zd*, parallèle à *fc*, jusqu'à la rencontre de *fd*, et par le point *f* le sinus *fg* de l'angle *fck*; le triangle *dzf* étant semblable au triangle *cgf*, nous aurons $fg : fz :: cf : df$, ou $\frac{fg}{fz} = \frac{cf}{df}$. Mais le premier rapport est constant, à cause que la force directrice est proportionnelle au sinus de l'angle *fck*. Donc le second rapport est aussi

constant ; et puisque *cf* est le rayon, la résultante *df* sera pareillement une quantité constante, qui passera toujours par le point *f* de l'aiguille.

808. Réciproquement, si la résultante de toutes les forces qui agissent sur l'aiguille, prise parallélement au méridien magnétique, est une constante, quelle que soit la quantité dont l'aiguille ait été écartée de ce méridien, les forces directrices seront proportionnelles aux sinus des angles d'écartement. Or, pour concevoir que la résultante dont il s'agit doit être une constante, il suffit encore de considérer que les pôles magnétiques du globe exercent leurs actions à des distances de l'aiguille qui sont presque infinies. Car supposons que l'aiguille *ab* (*fig.* 93), étant d'abord dans la direction *k'h'*, la même que celle qui est représentée (*fig.* 90), on lui fasse prendre une autre direction *gu*, de manière qu'elle continue de faire le même angle avec l'horizon. Imaginons un plan qui passe par les lignes *ab*, *gu* (*fig.* 93), et menons par le point *g*, dans le même plan, la ligne *ig*, parallèle et égale à *ok'* ; cette ligne *ig* représentera la résultante des forces qui agissent obliquement sur le point *g*, pour le ramener vers le point *a*. Or, la force suivant *ig* se décompose en deux autres, l'une *ip*, parallèle à *og*, et l'autre *ie*, perpendiculaire sur og. Donc, si nous complétons le parallélogramme *ipge*, la ligne *pg* représentera la partie de la force *ig* qui agit directement pour pousser le point *g* vers le point *a*. D'une autre part, soit *lu*, parallèle et égale à *oh'*, la résultante des forces qui s'exercent obliquement sur le point *u*, pour le ramener vers *b*. A l'aide d'une décomposition semblable à la précédente, la ligne *ut*, perpendiculaire sur *ot*, représentera la partie de la force oblique *lu*, dont l'effet est de pousser le point *u* vers le point *b*.

Maintenant, puisque les forces qui agissent sur l'aiguille concourent toutes à la faire tourner dans le même sens, pour la rapprocher de sa première position, nous pouvons les considérer comme étant appliquées au point *g* de l'aiguille, en doublant, par la pensée, l'intensité des actions suivant *ig* et *ie*. Dans cette hypothèse, *ig* représentera la résultante de

toutes les forces qui sollicitent l'aiguille, prises dans un sens parallèle à la direction *ab*, qui coïncide avec le méridien magnétique, et *ie* ou *pg* représentera la force directrice. Or, comme dans tous les changemens de direction que subit l'aiguille, en s'écartant du méridien magnétique, les positions de ses pôles ne varient qu'infiniment peu, eu égard aux distances des pôles magnétiques du globe, il est aisé de voir que la ligne *ig* est une constante. On peut même déduire immédiatement de la construction qu'offre la figure, la conséquence que les forces directrices sont proportionnelles aux angles d'écartement. Car, si l'on prend *ig* pour le rayon, relativement à l'angle *egi*, ou à son égal *aog*, la ligne *ie*, qui représentera la force directrice, étant le sinus du premier de ces angles, sera proportionnelle au sinus du second angle, qui mesure la quantité dont l'aiguille est écartée du méridien magnétique.

Différence entre l'Action du Globe et celle d'un Aimant ordinaire, sur une Aiguille Magnétique.

809. Ce qui précède peut servir à rendre raison d'une contradiction apparente qu'offre l'action du globe comparée à celle des aimants ordinaires. Si l'on met une aiguille magnétique sur une lame de liége, de manière qu'elle nage à fleur d'eau dans un vase d'une largeur suffisante, et que l'on place à une certaine distance un aimant, même d'une force médiocre, qui regarde le vase par un de ses pôles, l'action de cet aimant produira deux effets : d'abord l'aiguille se dirigera de manière que si c'est le pôle boréal de l'aimant qui se trouve le plus près du vase, elle tournera son pôle austral vers cet aimant ; et toutes les fois qu'on l'aura dérangée de cette position, elle y reviendra dès qu'on l'abandonnera à elle-même. En même temps elle s'avancera jusqu'au bord du vase, pour se rapprocher de l'aimant le plus qu'il sera possible. Or, si l'on répète cette expérience, par exemple vers le Nord, en laissant agir

le globe seul sur l'aiguille, il sera, par rapport à cette aiguille, dans le cas d'un aimant dont le pôle boréal exercerait sur elle une action plus forte que celle du pôle austral ; aussi l'aiguille se dirigera-t-elle de manière à regarder le Nord par son pôle austral, et si l'on change sa direction, elle la reprendra spontanément ; mais elle ne fera aucun mouvement vers le Nord, et restera stationnaire sur l'eau à l'endroit où elle aura été placée.

810. Cette diversité dans les résultats des deux expériences provient de ce que les centres d'action du globe sont, comme nous l'avons dit, à une distance presque infinie de l'aiguille ; d'où il suit que la différence entre les forces qui agissent pour tirer l'aiguille dans deux sens opposés, est sensiblement nulle ; et ainsi la tendance de l'aiguille à se porter vers le Nord, qui dépend de cette différence, doit pareillement se réduire à zéro. Or, la même chose n'a pas lieu lorsqu'on se sert d'un aimant qui agit sur les deux pôles de l'aiguille à des distances respectives comparables entre elles ; alors la différence entre les deux actions devient appréciable, et il en résulte une action boréale qui détermine l'aiguille à s'avancer vers l'aimant. Nous avons vu, d'une autre part, que le globe exerce sur nne aiguille magnétique *gu* (*fig.* 93), pour la ramener à sa première direction, des forces conspirantes suivant *ie* et *tu* ; et ici la grandeur de la distance n'empêche pas que ces forces ne conservent assez d'intensité pour produire leur effet.

Action du Globe sur le Fer non aimanté.

Nous avons maintenant à considérer des phénomènes où le parallèle se soutient entre le globe et les aimants qui sont à notre portée, relativement à la faculté qu'ont ces derniers de communiquer le magnétisme au fer placé dans leur sphère d'activité. De même l'action du globe, qui s'étend dans l'espace à des distances immenses, est capable de produire un certain degré de vertu magnétique dans les verges de fer et

autres corps semblables, dont la force coercitive n'est pas assez grande pour s'opposer à cette action.

811. Rappelons-nous ici ce qui a été dit (797) de cette même action sur deux molécules, l'une de fluide boréal, l'autre de fluide austral, pour faire mouvoir la première dans la direction *bh* (*fig.* 90), et l'autre dans la direction *ak*. Comme la communication du magnétisme est due à de semblables mouvemens qui ont lieu pour toutes les molécules magnétiques situées dans l'intérieur d'une verge de fer, il est d'abord évident que la position la plus favorable pour que cette verge acquière le plus haut degré de magnétisme possible, est celle qui coincide avec la direction *kh*. Si l'on suppose ensuite que la verge, en restant toujours dans le même plan GPK, prenne une autre position, telle que *mn* (*fig.* 94); et si nous considérons les lignes *ok*, *oh*, qui coincident avec la direction primitive, comme les résultantes des forces exercées par le globe, lorsque la position est la plus avantageuse, il faudra, dans le cas présent, décomposer la force *ok* suivant deux directions, l'une *kx* perpendiculaire sur *om*, et qui ne contribue en rien à l'effet, l'autre *ox* qui coincide avec *om*, et qui représente la force réelle; c'est-à-dire, que la force *ok* se trouve diminuée dans le rapport de *ok* à *ox*. Si nous décomposons de même la force *oh* suivant deux directions, l'une *hl* perpendiculaire sur *on*, l'autre *ol* qui se confond avec cette dernière ligne, *ol* représentera la force qui agit seule pour produire l'effet demandé.

A mesure que la verge s'écartera de la position *mn*, en prenant une direction *pr* qui fasse un angle encore plus ouvert avec la première, la quantité de la force réelle *os* ou *oy* ira toujours en diminuant; et lorsque la verge sera située sur la ligne *tz* qui fait un angle droit avec *kh*, la force réelle se trouvera réduite à zéro.

Passé ce terme, si l'on augmente l'angle que fait avec *kh* la nouvelle position de la verge, de manière, par exemple, que cette position coincide avec *bd*, les mêmes effets recommenceront; c'est-à-dire, que si l'on mène les lignes *kf* et *gh* perpen-

diculaires, l'une sur *od*, et l'autre sur *ob*, *of* représentera la force qui détermine le mouvement du fluide austral vers *d*, et *og* celle qui sollicite le fluide boréal à se mouvoir vers *b*.

Si l'on place la verge dans un autre plan que GPK (*fig.* 90), il est facile de concevoir que sa position la plus favorable, relativement à ce second plan, sera celle où sa direction fera le plus petit angle possible avec la ligne *kh*, et que le magnétisme acquis deviendra encore nul, lorsque la longueur de la verge, en restant dans le même plan, fera un angle droit avec *kh*.

812. On peut vérifier ces différens résultats, à l'aide d'une expérience aussi curieuse que simple et facile à faire. Vous prenez une barre de fer doux, et vous la tenez dans une des positions où l'action du globe puisse lui communiquer le magnétisme. La position la plus favorable, à Paris, est celle qui est inclinée d'environ 72$^{d.}$ à l'horizon, parceque c'est cette position que prendrait naturellement une aiguille, dont les deux moitiés auraient des poids égaux, et qui serait mobile autour d'un axe, à l'endroit de son centre de gravité; mais la position verticale suffit au succès de l'expérience. La verge étant donc située de cette manière, vous présentez son extrémité inférieure au pôle austral d'une aiguille aimantée placée sur son pivot, et vous observez qu'elle repousse ce pôle. Vous faites ensuite descendre la verge en la maintenant dans la même direction, jusqu'à ce que son extrémité supérieure se trouve vis-à-vis du même pôle de l'aiguille, et alors il y a attraction. Vous renversez la position de la verge, et aussitôt les pôles eux-mêmes se trouvent renversés. L'extrémité qui repoussait le pôle austral de l'aiguille l'attire, et celle qui l'attirait le repousse. Le fer doux n'opposant qu'une résistance peu considérable au mouvement interne des deux fluides qui se sont dégagés du fluide naturel, le magnétisme qu'il acquiert n'est qu'un effet fugitif qui, par le simple renversement de la verge, fait place à l'effet opposé. L'alternative subite de ces attractions et répulsions a un air de prestige, qui tendrait à faire soupçonner de subtilité la main du physicien, au point que cette belle expérience semble y perdre dans l'esprit des spectateurs.

On réussira à produire des effets semblables, même avec une simple clef, ou tout autre corps fait de fer mou et d'une forme alongée. Mais quand ce corps a peu de masse, il faut employer une aiguille qui soit faiblement aimantée, et dont l'action immédiate sur ce même corps ne puisse troubler celle du magnétisme naturel.

813. On peut varier de la manière suivante l'expérience dont il s'agit ici : la verge étant d'abord dans une position verticale, on fera avancer son extrémité inférieure jusqu'à une telle distance du pôle austral de l'aiguille que la répulsion ait commencé à se manifester, et l'on s'arrêtera à ce terme. On maintiendra ensuite l'extrémité inférieure de la verge dans la même position, tandis que l'on fera tourner doucement cette verge autour du même point dans un plan perpendiculaire à la direction de l'aiguille. Bientôt la répulsion diminuera, ensorte que l'aiguille se rapprochera de la verge, et finira par reprendre sa direction naturelle, au moment où la verge sera située à angle droit sur cette direction. Alors si l'on continue de faire tourner la verge, l'aiguille se portera vers elle par l'effet de l'attraction qui aura succédé à la répulsion; et en faisant osciller légérement la verge de part et d'autre de la position où son action était nulle, on verra l'aiguille prendre elle-même un mouvement d'oscillation, en vertu duquel elle s'écartera et s'approchera tour à tour de l'extrémité de la verge.

814. Æpinus a remarqué que lorsqu'on frappait à coups redoublés avec un corps dur une verge de fer que l'on tenait dans une position favorable, on secondait à l'égard de cette verge l'action du magnétisme terrestre. Les secousses imprimées à la verge, par ces percussions, occasionnent dans sa masse une espèce de vibration générale, qui en déplace un peu les particules, et qui, diminuant leur force coercitive, facilite le dégagement des deux fluides, et leurs mouvemens vers les deux extrémités de la verge.

C'est probablement en vertu d'un mécanisme semblable que l'on parvient à aimanter des aiguilles qui étaient encore dans l'état naturel, ou à renverser leurs pôles si elles étaient déjà

aimantées, en leur faisant subir une forte commotion électrique.

815. Les physiciens ont profité du léger degré de magnétisme que produit dans une verge la seule action du globe, pour résoudre ce problème singulier : *aimanter des barreaux d'acier jusqu'à saturation, sans avoir eu préalablement aucun aimant entre les mains.* Il ne s'agit que de faire prendre d'abord à des barreaux de fer mou un commencement de vertu, en les plaçant d'une manière convenable, relativement au méridien magnétique du lieu. On emploie ensuite ces barreaux pour en aimanter d'autres plus durs, que l'on passe avec frottement sur leur surface. Ces derniers font à leur tour la même fonction par rapport à de nouveaux barreaux; et à l'aide d'une méthode analogue à celle dont nous avons parlé, en traitant de la communication du magnétisme (768), on parvient à faire croître la force des barreaux dont il s'agit, jusqu'à son *maximum.*

816. Les détails qui précèdent peuvent servir à expliquer certains faits qui ont dû causer d'abord beaucoup de surprise, tels que le magnétisme qu'acquièrent naturellement les barres de fer qui ont une position constante au haut des édifices. Une des premières observations de ce genre dont on ait parlé, est celle que fit Gassendi, relativement à la tige qui soutenait la croix du clocher de Saint-Jean d'Aix en Provence. Cette observation a été renouvelée depuis sur d'autres tiges semblables.

817. Il n'est peut-être aucun point de Physique qui prouve mieux que celui qui nous occupe ici, combien les idées qui ont rapport à une science s'étendent et s'agrandissent, à mesure que la science elle-même fait des progrès et marche vers sa perfection. Un aimant passait autrefois pour une espèce de merveille, autant par sa rareté que par ses effets, et aujourd'hui l'observation nous apprend que tous ces instrumens de fer mou que nous avons à chaque instant sous les yeux et entre les mains, sont maintenus dans un état habituel de magnétisme polaire, par l'influence du globe terrestre. Seulement leurs pôles sont variables et se renversent continuellement par les change-

mens de position que ces corps subissent d'un instant à l'autre. A l'égard des instrumens d'acier que leur grande force coercitive rend plus capables de résister à l'action du globe, pour leur communiquer la vertu magnétique, cette action ne laisse pas de produire son effet, lorsqu'elle est secondée par des circonstances particulières. Ainsi les limes, les ciseaux et autres instrumens qui sont exposés à des frottemens, à des secousses, ou à des percussions capables de donner du jeu à leurs molécules, passent peu à peu à l'état de magnétisme, et deviennent susceptibles d'enlever des parcelles de limaille ou des fils de fer d'un petit volume.

6. Du Magnetisme des Mines de Fer.

Les mines de fer répandues dans l'intérieur du globe avec une abondance proportionnée à l'utilité de ce métal, le plus précieux de tous, ont été l'objet de diverses observations particulières, qui offrent une confirmation des principes que nous avons établis, relativement à la manière d'agir des forces magnétiques.

818. On a quelquefois observé que des morceaux d'aimant qu'on venait de retirer de la terre, et qu'on laissait dans la même position où ils étaient avant l'extraction, avaient leurs pôles situés en sens inverse de celui qui aurait dû avoir lieu dans l'hypothèse où ces morceaux auraient acquis leur magnétisme par l'action d'un aimant placé au centre du globe, ou par celle du globe même, considéré comme faisant l'office d'un aimant. Pour lever la difficulté qui paraît en résulter, il faut simplement supposer avec Æpinus, qu'il se forme naturellement dans les mines d'aimant des *points conséquens*, analogues à ceux que l'on observe quelquefois par rapport au fer que nous aimantons par les procédés ordinaires (762). On concevra dès lors comment il peut se faire que quand on détache un fragment de mine dans laquelle il existe une série de points conséquens, la séparation ait lieu de manière que les

deux pôles qui terminent le fragment, soient autrement tournés que dans les morceaux qui ont reçu le magnétisme ordinaire.

819. Les minéralogistes ont regardé comme une espèce particulière de mine de fer, qu'ils ont nommée *aimant*, celle qui a les deux pôles magnétiques ; c'était le *ferrum attractorium* de Linnæus. Parmi les autres mines, celles qui n'avaient point de pôles distincts, mais seulement la faculté d'être attirées par le barreau aimanté, s'appelaient *ferrum retractorium* : enfin, on nommait *ferrum refractarium*, celles qui se refusaient à l'action de ce barreau. Delarbre annonça, en 1786, que les fers spéculaires de Volvic, du Puy-de-Dôme et du Mont-d'Or avaient deux pôles bien marqués (1), et nous avons entendu parler d'une observation semblable faite sur un cristal de fer octaèdre de Suède, ou de quelque autre endroit ; mais il restait un sujet de surprise à la vue de tant d'autres corps qui, renfermant une certaine quantité de fer à l'état métallique, avaient séjourné si long-temps dans le sein de la terre, sans paraître avoir participé à l'action qui avait converti les premiers en aimants.

820. Nous avons entrepris récemment de faire des expériences pour éclaircir ce point de Physique ; mais nous avons considéré que si nous nous servions d'un barreau d'une certaine force, comme on le fait communément pour éprouver le magnétisme des mines de fer, il pourrait arriver que des corps qui ne seraient que de faibles aimants attirassent indifféremment les deux pôles du barreau ; parceque dans le cas où l'on présenterait, par exemple, le pôle boréal du corps soumis à l'expérience, au pôle boréal du barreau, la force de celui-ci pourrait détruire le magnétisme de l'autre, et de plus y faire succéder l'état contraire, ce qui changerait la répulsion en attraction. Nous avons donc pris une aiguille qui n'avait qu'un assez léger degré de vertu, semblable à celles dont on garnit

(1) Journal de Physique ; 1786, p. 119 et suiv. Romé de Lisle avait déjà dit la même chose par rapport à une mine de fer spéculaire de Philadelphie. Cristal., t. III, p. 189, note 35.

les petites boussoles à cadran : dès cet instant tout devint aimant entre nos mains. Les cristaux de l'île d'Elbe, ceux du Dauphiné, de Framont, de l'île de Corse, etc., repoussaient un des pôles de la petite aiguille par le même point qui attirait le pôle opposé. Nous avons trouvé peu d'exceptions; et peut-être les corps qui sont dans ce cas ont-ils perdu leur magnétisme, depuis qu'ils ont été retirés de la terre. Ce qui peut le faire présumer, c'est la facilité avec laquelle ils acquièrent des pôles lorsqu'on les met en contact, seulement une ou deux secondes, avec un barreau d'une force moyenne.

Il serait possible d'ailleurs que quelques cristaux eussent échappé à l'action du magnétisme du globe, pour avoir été situés de manière que leur axe fût perpendiculaire à la direction du méridien magnétique de leur lieu natal.

821. Il nous vint en idée qu'il pourrait se faire qu'un cristal à l'état d'aimant parût, en conséquence de cet état même, n'avoir aucune action sur un autre aimant. Pour vérifier cette conjecture, nous avons substitué à l'aiguille le barreau dont on se sert ordinairement, et nous avons présenté à l'un des pôles de ce barreau un cristal de l'île d'Elbe, par le pôle de même nom. Le barreau n'ayant à peu près que la force nécessaire pour détruire le magnétisme du pôle qu'on lui présentait, et remettre ce pôle dans l'état naturel, il n'y eut ni attraction, ni répulsion sensible de ce côté; tandis que le même pôle du cristal, présenté à l'autre pôle du barreau, faisait mouvoir celui-ci. On voit par là qu'en se bornant à une seule observation, on pourrait en tirer une conclusion très-opposée à la vérité.

Il restait à dissiper une petite incertitude relativement aux résultats que nous venons d'énoncer. Lorsqu'on présente un morceau de fer non aimanté, par exemple une clef, dans une position verticale, ou à peu près, au pôle austral d'une aiguille aimantée, ce pôle est toujours repoussé par le bout inférieur de la clef, tandis que le même bout attire le pôle boréal (1):

(1) Nous supposons ici que l'observation se fasse dans nos contrées.

c'est, comme nous l'avons vu (812), l'effet du magnétisme que l'action du globe terrestre communique à la clef, et qui est si fugitif, que si l'on renverse la position de cette clef, à l'instant les effets contraires auront lieu ; mais on ne pouvait pas dire que les cristaux soumis à l'expérience fussent dans la même circonstance que cette clef, soit parceque leur action était constante, quelle que fût la position qu'on leur donnait, soit parcequ'il s'en trouvait dont l'extrémité inférieure repoussait le pôle boréal de l'aiguille, et attirait son pôle austral.

822. Il résulte de ces observations, que tous les morceaux de fer enfouis dans la terre, qui n'abondent pas trop en oxygène, ou du moins la très-grande partie, sont des aimants naturels, qui seulement varient par leur degré de force entre des limites très-étendues : en conséquence, l'aimant ne doit pas former une espèce à part en minéralogie ; et ce qu'on appelle communément de ce nom, n'est que le premier terme et le mieux prononcé d'une série où la nature marche par nuances, à son ordinaire, et où nous pouvons la suivre très-loin, en employant des moyens assortis à la délicatesse des mêmes nuances.

Du Magnétisme du Nickel et du Cobalt.

823. Nous ajouterons ici quelques détails sur deux substances métalliques, qui paraissent douées, ainsi que le fer, d'une vertu magnétique très-sensible. L'une est le nickel qui, dans l'état où la nature l'a offert jnsqu'ici, est toujours uni à l'arsenic et au fer. Il ne produit alors aucun mouvement dans le barreau aimanté. Mais cette observation ne prouve rien, parceque l'arsenic a cette propriété singulière, que sa présence, même lorsqu'il est en petite quantité, masque entièrement l'action du magnétisme.

Bergmann, qui a fait de nombreuses expériences sur le nickel, s'était apperçu que quand on avait épuré ce métal, autant qu'il était possible, il agissait sur le barrean aimanté.

Le célèbre Klaproth, de son côté, après avoir découvert que la variété d'agathe, nommée *Chrysoprase*, devait sa couleur verte à l'oxide de nickel, crut pouvoir regarder comme très-pure la portion de ce métal qu'il avait obtenue par l'analyse de la pierre dont il s'agit (1); et voyant que le nickel, dans cet état, continuait d'être attirable, il pencha fortement à croire que ce même métal partageait avec le fer les propriétés magnétiques.

Cependant on pouvait être tenté de soupçonner que le nickel, lorsqu'on le croyait pur, recélait encore quelques molécules ferrugineuses que la puissance des agens chimiques n'avait pu lui arracher.

824. Nous nous sommes proposé d'écarter, s'il était possible, ce soupçon, en soumettant à l'expérience une lame de nickel épuré obtenue par Vauquelin, dont le poids est de 45 centigrammes, ou environ 8 grains $\frac{1}{2}$, et la longueur de 16 millimètres, à peu près 7 lignes. Cette lame agissait d'abord par attraction sur l'un et l'autre pôle d'une aiguille aimantée; mais on parvint facilement à lui communiquer le magnétisme polaire, en employant la méthode de Coulomb (773), ensorte qu'elle exerçait des attractions et des répulsions très-marquées sur l'aiguille, et qu'ayant été suspendue à un fil de soie très-délié, elle se dirigea aussitôt dans le plan du méridien magnétique. De plus, un fil de fer dont le poids était à peu près la moitié de celui de cette lame, ayant été mis en contact avec elle, y demeura suspendu par l'effet du magnétisme.

M. Biot a comparé depuis la force magnétique du nickel avec celle de l'acier, en faisant osciller deux lames rectangulaires de $0^{met.},2127$ de longueur sur $0^{met.},006$ de largeur, et dont l'une qui était de nickel pesait $5^{gram.},178$, et l'autre qui était d'acier pesait $4^{gram.},586$. La première avait été épurée avec tout le soin possible par M. Thénard, dont l'habileté est connue.

Les deux lames ayant été aimantées à saturation furent

(1) Annales de Chimie, t. I, p. 169.

suspendues à des fils de soie ; celle de nickel fit 10 oscillations en 87$^{sec.}$, et celle d'acier en fit le même nombre en 45$^{sec.}$,5. Mais les forces magnétiques de deux corps, à égalité de dimensions, sont en raison directe des poids, et en raison inverse des carrés des temps employés à faire un nombre donné d'oscillations ; donc la force magnétique du nickel est à celle de l'acier comme $\frac{5,178}{(87)^2}$ est à $\frac{4,586}{(45,5)^2}$, ou comme 0,000684 est à 0,002215 ; c'est-à-dire que la première est un peu moins que le tiers de la seconde.

Or, la quantité de fer qu'il faudrait supposer dans les lames de nickel dont nous venons de parler, pour qu'elles fussent capables de produire de si grands effets, n'aurait pas échappé aux moyens très-précis employés par les deux célèbres chimistes qui ont, en quelque sorte, épuisé toutes les ressources de leur art, pour amener ces lames à l'état de pureté, et ensuite pour s'assurer qu'ils avaient atteint leur but ; et l'on ne pourrait, sans avoir recours à des suppositions forcées, attribuer le magnétisme des mêmes lames à un résidu de fer, dont le lien avec le nickel n'aurait pu être rompu par la puissance de l'analyse.

825. L'autre substance est le cobalt qui, dans ses mines, est de même toujours mêlé de fer et d'arsenic, et qui étant épuré, autant que les ressources de la chimie peuvent le permettre, manifeste aussi un magnétisme très-sensible. Wenzel a fait, avec ce métal, des aiguilles qui, après avoir été aimantées, se dirigeaient comme celles des boussoles ordinaires (1). Au fond, rien ne répugne à ce que d'autres métaux aient, ainsi que le fer, la faculté de retenir le fluide magnétique engagé dans leurs pores ; et cette espèce de prérogative que l'on croyait accordée au fer seul, devait même paraître d'autant plus singulière, qu'en général la nature n'est pas ainsi exclusive dans sa manière d'agir.

(1) Gren, Manuel Systém. de Chimie, deuxième édition, t. III, p. 516 et suiv.

7. Des différentes Hypothèses imaginées par les Physiciens, sur la cause du Magnétisme qu'exerce le Globe terrestre.

826. Descartes et les physiciens qui ont suivi sa doctrine avaient expliqué les phénomènes des aimants ordinaires, à l'aide d'une hypothèse qui leur paraissait s'adapter comme d'elle-même au magnétisme naturel. Ils pensaient que le globe terrestre était en grand, ce qu'était un aimant en petit ; que le fluide magnétique circulait continuellement d'un pôle à l'autre, et entraînait dans sa direction les aiguilles aimantées librement suspendues. Comme le tourbillon formé par ce fluide suivait la courbure du globe, il déterminait l'aiguille à s'incliner vers un pôle ou vers l'autre, à mesure qu'on l'écartait de l'équateur. A l'égard de la déclinaison, on essayait de l'expliquer, en supposant que les pôles du tourbillon magnétique ne coincidaient pas avec ceux du globe, mais s'en écartaient d'une certaine quantité. Avec cette manière plutôt vague que générale de concevoir la cause du magnétisme, on éludait la détermination de tous les phénomènes particuliers, ou, pour mieux dire, de toutes les anomalies apparentes que présente l'observation assidue des mouvemens de l'aiguille. On ignorait alors cette vérité si importante pour le progrès des sciences, que, si les idées générales sont la base des théories, c'est par les détails qu'on juge de la solidité de cette base.

827. Depuis qu'on a cherché à mettre de la précision dans l'explication des phénomènes du magnétisme, les tourbillons ont disparu, et l'on a substitué aux impulsions imprimées par leurs molécules aux aiguilles magnétiques, des forces qui s'exerçaient à distance sur ces aiguilles, et qui avaient leurs centres d'action dans l'intérieur même du globe. Et comme il était naturel de donner un sujet aux forces dont il s'agit, les physiciens se partagèrent, à cet égard, entre deux opinions différentes, mais puisées dans l'analogie avec les phénomènes déjà connus.

connus. Les uns eurent recours à l'action des mines d'aimant, que l'on supposait être très-abondantes vers les pôles. La disposition irrégulière des masses dont ces mines étaient formées, occasionnait les diversités que l'on observe, pour un instant, dans les déclinaisons et les inclinaisons des aiguilles situées à différens points de la terre ; et les changemens successifs que subissaient les mines, par l'action des diverses causes qui les altéraient, ou les détruisaient à tel endroit, tandis qu'ailleurs il s'en produisait de nouvelles, faisaient varier à leur tour, avec le temps, la quantité de la déclinaison ou de l'inclinaison, pour chaque lieu particulier.

828. Halley, Æpinus et d'autres physiciens, sans nier l'influence des mines d'aimant sur la direction des aiguilles, l'ont regardée seulement comme une force secondaire, et ont supposé que la force principale provenait d'un très-gros aimant de figure globuleuse, ou à peu près, qui formait comme le noyau du globe terrestre. Halley avait de plus imaginé que ce noyau devait avoir un mouvement très-lent, par lequel sa position changeait continuellement à l'égard du globe, ce qui servait à expliquer, selon ce physicien, les variations que le temps apporte dans l'inclinaison et la déclinaison des aiguilles, relativement à un même lieu.

829. Æpinus n'admet point ce mouvement, qui lui paraît insuffisant et même absolument inutile ; et pour ramener les phénomènes à l'hypothèse d'un noyau fixe, il observe d'abord que si le fluide était distribué uniformément dans ce noyau, ensorte que ses deux centres d'action ayant des forces égales, fussent situés sur l'axe de la terre à des distances égales du centre, la déclinaison serait nulle à tous les points du globe, tandis que l'inclinaison, nulle seulement à l'Equateur, croîtrait vers les pôles, suivant une loi qui serait en relation avec le changement de latitude.

Mais la distribution du fluide se fait irrégulièrement à l'intérieur du noyau magnétique. Dans certaines parties, le fluide est plus accumulé ; dans d'autres il est plus rare ; et il en résulte que les positions des centres d'action changent conti-

nuellement à l'égard d'une aiguille portée à différens points de la terre. Si le point auquel répond actuellement l'aiguille est tellement situé, que la résultante de toutes les forces qui agissent diversement sur elle des différens points du noyau magnétique soit parallèle à l'axe de la terre, la déclinaison sera nulle ; et suivant que cette résultante fera un angle plus ou moins ouvert avec l'axe du globe, la déclinaison elle-même sera plus ou moins considérable.

D'un autre côté, la distribution du fluide change avec le temps dans l'intérieur du noyau, et ces changemens déterminent ceux que subissent la déclinaison et l'inclinaison de l'aiguille dans un même lieu.

830. A l'égard de la variation diurne en déclinaison, M. Canton a cru pouvoir l'expliquer par la diminution de force attractive que la chaleur des rayons solaires devait occasionner dans le noyau magnétique du globe. Cette diminution ayant lieu le matin, par rapport aux parties situées vers l'Est, l'aiguille, moins attirée de ce côté, devait décliner vers l'Ouest, et l'effet opposé devait avoir lieu pendant l'après-dînée.

831. Une observation faite par Lahire semble donner une nouvelle couleur à l'hypothèse dont nous venons de parler. Ce physicien ayant taillé, en forme de sphère, un aimant naturel qui pesait près de cent livres, et en ayant déterminé l'axe, d'après la position des pôles magnétiques, traça sur cette sphère un équateur et un certain nombre de méridiens. Il fit ensuite correspondre une aiguille aimantée successivement à différens points de cet aimant, et il remarqua que dans quelques-uns de ces points elle se dirigeait exactement d'un pôle à l'autre, et que dans d'autres points elle déclinait à droite ou à gauche, ensorte que la plus grande déclinaison observée se trouvait être d'environ 26 degrés.

832. Tel était l'état de nos connaissances, relativement au magnétisme naturel, lorsque Coulomb, à qui la détermination de toutes les petites forces qui exigent des attentions délicates semble être tombée en partage, fut conduit, par des expé-

riences de ce genre, à des résultats imprévus, qui tendent à répandre un nouveau jour sur le point de Physique qui nous occupe. Ce savant célèbre prit deux barreaux aimantés, qu'il disposa sur une même ligne droite, de manière que leurs pôles opposés étaient éloignés l'un de l'autre d'environ 15 millimètres. Il plaça dans l'espace intermédiaire, successivement, de petits cylindres faits de diverses matières, et dont la longueur était de sept à huit millimètres. Chaque cylindre était suspendu librement à un fil de soie, tel qu'il sort du cocon. Coulomb observa que ce cylindre, de quelque matière qu'il fût composé, se disposait toujours exactement suivant la direction des barreaux, et si on le détournait de cette direction, il y était constamment ramené, après un certain nombre d'oscillations. L'or, l'argent, le cuivre, le plomb, l'étain, le verre, la craie, les os des animaux, et différens bois furent soumis à l'expérience, et tous ces corps éprouvèrent l'action des barreaux magnétiques (1).

833. Il se présentait deux manières d'expliquer ces phénomènes : l'une consistait à dire que tous les élémens qui entrent dans la composition de notre globe étaient, par leur nature, susceptibles de la vertu magnétique, mais que, dans la plupart des corps, cette vertu était presque insensible ; ensorte que, jusqu'à présent, elle n'avait guère été observée que dans le fer, qui la possède à un degré éminent ; l'autre explication supposait que l'action magnétique exercée par les barreaux, dans les expériences que nous avons citées, était due à des molécules de fer répandues indistinctement dans les différentes substances naturelles, et qui échappaient à tous les efforts de l'analyse chimique. Coulomb, qui avait d'abord penché en faveur de la première explication, paraît avoir balancé depuis entre l'une et l'autre ; il a projeté une suite d'expériences dont il a déjà exécuté quelques-unes, et dont le but est de mesurer l'action des barreaux sur les différens corps, et de chercher quelle serait, relativement à la masse de chacun de ces corps, la

(1) Journal de Physique ; floréal an x, p. 367 et suiv.

quantité de fer qu'il faudrait supposer disséminée dans son intérieur, pour produire le nombre d'oscillations qu'il fait dans un temps donné.

834. Quoi qu'il en soit, le fait que nous venons d'exposer est d'autant plus intéressant, qu'il conduit à considérer le globe terrestre, pris dans toute son étendue, comme un aimant unique, dont la force est la somme de toutes celles qu'exercent les molécules qui le composent. Ce fait une fois bien établi, par rapport à tous les corps terrestres, remplacerait avantageusement l'hypothèse d'un noyau magnétique particulier, qui a l'air d'avoir été imaginée par les physiciens, plutôt pour donner un support à leurs conceptions, que pour représenter la nature.

835. Nous remarquerons ici que M. Prevost avait déjà avancé qu'il n'était pas nécessaire de recourir à un noyau particulier, pour expliquer le magnétisme naturel. Il suffit, suivant ce célèbre physicien, que la décomposition du fluide magnétique, qui ne se fait que dans l'intérieur du fer, par les moyens que nous avons à notre disposition, puisse avoir lieu même hors de ce métal par des causes naturelles plus puissantes que les agens de l'art, et dont l'influence permanente maintiendrait les deux pôles du globe dans deux états de magnétisme opposé (1).

836. Nous avons cité plus haut (799) les résultats des recherches importantes faites par le célèbre Biot, sur les positions des centres d'action magnétique, telles que les indique l'accord du calcul avec les inclinaisons observées. Pour que ces résultats aient lieu, il suffit de supposer un aimant d'une extrême petitesse, placé au milieu du globe terrestre, puisque les centres dont il s'agit coincident presque dans un même point. Mais cette proximité des centres s'accorde également avec la supposition d'un aimant de forme globuleuse, qui aurait un volume très-considérable, et dont toutes les molécules seraient autant de petits aimans en contact par leurs pôles

(1) De l'Origine des Forces Magnétiques, p. 210 et suiv.

opposés, comme dans un barreau magnétique ordinaire (756), et cela de manière que tous les pôles occupés par le fluide boréal fussent un peu plus près du Nord que ceux qui renfermeraient le fluide austral. Car si l'on fait abstraction, pour un instant, de toutes les actions australes exercées par ces petits aimans, la somme des actions boréales sera la même que si elles étaient toutes réunies dans un point très-voisin du centre et situé un peu vers le Nord (1). Si, au contraire, on supprime, par la pensée, les actions boréales, pour ne considérer que les actions australes, le point de concours de celles-ci sera de même très-voisin du centre, mais situé un peu vers le Sud. Donc si l'on suppose que les deux espèces d'actions s'exercent simultanément, elles équivaudront à deux actions totales qui résideraient dans deux points situés à de très-petites distances du centre de l'aimant globuleux, l'un vers le Nord, l'autre vers le Sud.

837. Les recherches des physiciens modernes pour perfectionner la science du magnétisme ne sont pas encore arrivées à leur terme. Parmi les phénomènes qui en attendent de nouvelles, la déclinaison de l'aiguille et la variation de l'intensité de la force magnétique sont ceux à l'égard desquels nos connaissances soient le plus en retard. Quelques savans ont cru avoir trouvé la loi de la déclinaison, et ramené ce phénomène à une espèce de progression, qui devait en donner la quantité pour chaque lieu de la terre. On a même été jusqu'à prétendre que la déclinaison pouvait servir à résoudre le problème des longitudes. Mais, suivant la remarque du célèbre Biot, la recherche extrêmement difficile des lois auxquelles sont soumises la déclinaison et l'intensité, exigerait, pour être tentée avec succès, des observations peut-être plus nombreuses et plus précises que celles qui ont été recueillies jus-

(1) C'est une suite de ce qui a été dit (41), relativement à la manière d'agir d'une sphère dont toutes les particules attirent ou repoussent en raison inverse du carré de la distance.

qu'à présent. On pourrait dire qu'à cet égard la physique du magnétisme n'est pas encore mûre pour la géométrie.

838. Terminons par une réflexion qui sort naturellement du sujet que nous venons de traiter. L'aimant n'a été, pendant long-temps, qu'un sujet d'amusement. Il ne paraissait plus rien en l'absence du fer, et cependant une découverte imprévue a prouvé qu'il n'avait besoin que de lui-même pour nous rendre des services importans, et que sous l'apparence d'un simple jeu, il avait caché jusqu'alors un présent inestimable destiné à la navigation ; et depuis cette époque, toutes les ressources d'une Physique ingénieuse ont été employées pour donner aux aiguilles de boussole la forme la plus susceptible d'augmenter leur énergie, et pour leur procurer une mobilité qui les rendît plus dociles à l'action du globe terrestre. Ainsi, parcequ'un objet relatif aux sciences ne semble d'abord conduire qu'à des spéculations oisives, ce n'est pas un motif pour le condamner à l'oubli : outre qu'il en résulte des connaissances propres à exercer la sagacité de l'esprit et à orner la raison, ces connaissances servent souvent elles-mêmes à éclairer des vérités d'usage qui en sont voisines, et elles participent des avantages de ces dernières, en nous aidant à les approfondir ; mais de plus, elles peuvent recéler à leur tour une utilité cachée, qui enfin se déclarera, et les momens que nous leur donnons préparent peut-être celui où elles cesseront d'être stériles pour le bien de la société.

VIII. DE LA LUMIÈRE.

Après avoir développé les différens phénomènes produits par les fluides répandus autour de nous et dans les régions voisines de notre globe, nous nous éleverons maintenant jusqu'à la considération de la lumière qui a sa source dans les astres, et dont l'action embrasse la sphère entière de l'univers.

839. La Physique ne nous offre nulle part un objet plus

digne de notre étude, soit par la beauté, soit par le nombre des phénomènes. Les services que nous tirons du fluide qui nous éclaire, seraient seuls capables d'exciter toute notre attention pour bien connaître ses propriétés. Si l'air, en servant de véhicule à la parole, nous met en commerce de pensées avec nos semblables, la lumière ajoute un grand prix à ce commerce, en nous rendant présente leur image, qui elle-même a tant de choses à nous dire. Plus susceptible d'impressions variées que les autres sens, l'œil, par le secours de la lumière, saisit tout à la fois dans les corps, les formes qui les terminent, les couleurs qui les embellissent, les rapports de leurs positions, les mouvemens qui les transportent dans l'espace; il démêle, sans aucune confusion, toutes ces modifications qui semblent se jouer de mille manières dans cette grande diversité d'objets auxquels s'étend le pouvoir d'un simple regard.

Mais si la vision n'était que directe, la partie même dans laquelle l'œil a son siége, celle qui nous caractérise et qui nous fait reconnaître par les autres, serait restée inconnue pour nous-mêmes : la lumière y supplée, en nous offrant notre portrait fidèle derrière les surfaces réfléchissantes dont l'action multiplie tout ce qui se présente devant elles.

Ce n'est point encore là que se bornent les services que nous tirons de ses propriétés. Au-delà des globes qui brillent sur nos têtes, il en existe d'autres qui se dérobent à notre vue par l'immensité de leur éloignement, tandis que près de nous, des milliers d'êtres organiques échappent de même à nos yeux par leur extrême petitesse. La lumière, en se repliant dans les corps diaphanes terminés par des faces curvilignes, nous a mis à portée d'appercevoir ces deux espèces d'infinis; elle a ouvert un nouveau ciel à l'astronomie, et un nouveau champ à l'histoire naturelle.

840. On a cet avantage dans la théorie de la lumière, que la marche de ce fluide est géométrique, ensorte qu'en partant d'un petit nombre de lois, on parvient à déterminer les résultats par des méthodes précises et rigoureuses. On sait que le célèbre

Saunderson, quoiqu'avengle depuis sa première enfance, donnait des leçons publiques d'optique; il considérait les rayons de la lumière comme de simples lignes matérielles, qni agissaient sur l'œil par contact, et en voyant ces lignes par la pensée, il faisait concevoir anx autres comment leurs yeux voyaient les objets mêmes dont elles excitaient en eux l'impression.

841. On peut considérer la lumière, dans l'état de composition qui lui est naturel, et sons lequel on la voit d'une blancheur éclatante, ou comme étant décomposée en différentes espèces de rayons diversement colorés. Les propriétés relatives au premier état conduisent à déterminer ce qn'on peut appeler *les routes de la lumière*. Ce fluide tend toujours par lui-même à se mouvoir en ligne droite. Mais il arrive souvent qu'il rencontre un obstacle qui lui refuse le passage, et lui permet seulement de se réfléchir sur sa surface, ou bien un milieu, c'est-à-dire, un corps transparent, qu'il pénètre en éprouvant une déviation, à laquelle on a donné le nom de *refraction*. En comprenant sous la dénomination générale d'*optique*, tout ce qui concerne la science de la lumière, on a appliqué plus spécialement cette dénomination à la partie qui traite de la lumière directe : on a appelé ensuite *catoptrique* celle qui considère la lumière réfléchie par les surfaces des miroirs; et *dioptrique* celle qui a pour objet la lumière réfractée à son passage d'un milien plus dense dans un autre plus rare, ou réciproquement. Plusieurs physiciens, pour s'etre attachés à suivre rigoureusement l'ordre prescrit par cette soudivision, ont manqué un but plus essentiel, qui est de ramener les idées elles-mêmes à la méthode analytique, et d'éviter de faire entrer, dans l'explication d'nn phénomène, des connaissances qui ne seront exposées que dans la suite. Ainsi on a compris dans l'optique proprement dite plusieurs effets de la vision qui supposent l'intelligence de la structure de l'œil, tandis que cette structure elle-même ne peut être bien conçue que d'après les principes de la dioptrique.

Voici l'ordre que nous nous sommes proposé de suivre pour conserver, autant qu'il sera possible, la liaison des idées, et ne

point laisser prendre l'avance aux vérités dont le tour n'est pas encore venu.

Nous examinerons d'où provient la lumière, sous quelle forme elle se répand, quelle est sa vîtesse, et suivant quelle loi son intensité diminue à mesure qu'elle s'éloigne du corps lumineux.

De ces principes, qui ont rapport à la lumière directe, nous passerons aux lois générales de la réflexion et de la réfraction; nous exposerons ensuite les phénomènes qui concernent la lumière décomposée et les couleurs.

Ces principes une fois établis, nous en ferons l'application à la vision, soit naturelle, soit aidée par les instrumens de catoptrique et de dioptrique.

1. De la Nature et de la Propagation de la Lumière.

842. Lorsqu'un corps lumineux répand sur tous les autres corps renfermés dans sa sphère un éclat qui affecte nos yeux, et rend ces corps visibles pour nous, cet effet suppose nécessairement l'existence d'un fluide dont l'action s'exerce, et sur les objets éclairés, et sur l'organe qui les apperçoit. Ce fluide est-il une matière subtile qui remplit toute la sphère de l'univers, et à laquelle le corps lumineux imprime une agitation qui se transmet ensuite de proche en proche, comme les vibrations du corps sonore se propagent par l'intermède de l'air? Telle était l'hypothèse de Descartes, admise par plusieurs physiciens modernes qui, pour l'adapter au phénomène de la réflexion et à celui de la propagation de la lumière, y ont fait quelques changemens, en supposant que les particules de ce fluide, au lieu d'etre inflexibles et tout-à-fait contiguës, comme le voulait Descartes, étaient élastiques et laissaient entre elles de petits intervalles. La lumière provient-elle, au contraire, d'une émission ou d'un écoulement des particules propres du corps lumineux qu'il lance sans cesse de tous côtés, par un

effet de l'agitation continuelle que lui-même éprouve? Dans cette hypothèse, qui est celle de Newton, il en serait de la lumière, du moins quant à la manière dont elle est produite, comme des corpuscules émanés des corps odorans.

Un rayon de lumière, selon Descartes, est une file de molécules dont les mouvemens consistent dans de très-petites oscillations, qui se répètent continuellement : suivant Newton, c'est une file de molécules qui ont toutes un mouvement de transport, et se succèdent sans interruption.

Dans les deux hypothèses, on considère chaque point d'un corps lumineux comme le sommet commun d'une infinité de cônes d'une très-petite épaisseur, composés de rayons qui s'étendent indéfiniment tant que rien ne les arrête. On donne quelquefois à ces cônes eux-mêmes le nom de *rayons*, et alors l'axe du cône est la ligne à laquelle on rapporte la direction du mouvement de la lumière.

843. Les deux hypothèses ont chacune en leur faveur des autorités d'un grand poids. Cependant, si on les compare sous tous les rapports, on ne pourra refuser la préférence à celle de Newton. Celle de Descartes a d'abord contre elle une objection très-forte, à laquelle on a tenté en vain de répondre d'une manière satisfaisante; car dans cette hypothèse, la lumière ne se répandrait pas seulement en ligne directe, mais son mouvement se transmettrait dans tous les sens comme celui du son, et irait porter l'impression des corps lumineux dans les espaces situés au-delà des obstacles qui se présenteraient pour l'arrêter. Nous devrions donc avoir un jour perpétuel; et jamais, dans les éclipses totales de soleil, nous n'aurions cette disparition de la lumière qui change tout d'un coup l'éclat d'un jour serein en une nuit profonde.

844. Les difficultés qu'on oppose à l'hypothèse Newtonienne n'ont pas, à beaucoup près, la même force. On a objecté que les rayons de la lumière, qui nous sont envoyés par les astres sous une infinité de directions différentes, se feraient obstacle les uns aux autres, et ne pourraient continuer leur mouvement rectiligne. Mais on peut supposer que les molé-

cules de la lumière étant d'une ténuité extrême, comme tout nous porte à le croire, leurs distances respectives sont incomparablement plus grandes que leurs diamètres ; et comme les moléçules d'un rayon trouvent un passage d'autant plus libre entre celles des autres rayons, ou sont d'autant moins exposées à les rencontrer, que le rapport entre les distances et les diamètres est plus considérable, l'obstacle deviendra sensiblement nul, si l'on conçoit que le rapport soit presqu'infini (1).

Par une suite nécessaire, la quantité de lumière fournie par les astres, même pendant une durée immense, sera si petite que leur volume n'en sera pas sensiblement diminué.

Les partisans de l'autre hypothèse n'ont point à résoudre ces difficultés, parcequ'il en est des vibrations de la lumière, dans cette hypothèse, comme de celles de l'air, et ainsi on peut leur appliquer ce que nous avons dit (512) de la propagation des sons simultanés, qui se croisent sans se confondre : mais l'avantage qu'elle paraît avoir à cet égard est déjà plus que balancé par l'objection que nous avons citée ; et tous les faits que nous exposerons, dans la suite, tendront à établir, de plus en plus, la supériorité de l'hypothèse Newtonienne. En général, on ne pourrait reprocher à celle-ci que de mener à des conséquences qui étonnent l'imagination, et elle a cela de commun avec plusieurs vérités incontestables.

Au reste, quand même on ne la regarderait pas comme suffisamment démontrée, elle mériterait d'être adoptée, par cela seul qu'elle conduit à une explication aussi heureuse que satisfaisante des phénomènes, entre autres, de ceux de la réfraction et de l'aberration, tandis qu'il est très-difficile de les concevoir dans l'hypothèse de Descartes.

(1) Smith, Traité d'Optique, traduction française ; 1767, p. 721.

Affaiblissement de la Lumière, à mesure qu'elle s'éloigne des Corps lumineux.

845. Considérons maintenant un des cônes de lumière qui ont leurs sommets aux différens points d'un corps lumineux, et concevons un plan qui coupe ce cône dans un sens que nous supposerons, pour plus grande simplicité, être perpendiculaire à l'axe du cône. Si nous faisons mouvoir ce plan parallélement à lui-même, en allant du sommet vers la base, il interceptera des cercles dont les surfaces iront en croissant comme le carré de la distance au sommet, laquelle est mesurée par la partie de l'axe qu'il intercepte en même temps ; et puisqu'il reçoit toujours un même nombre de rayons, il en résulte que l'intensité de la lumière dans un espace donné, pris sur ce plan, est en raison inverse du carré de la distance. Donc si l'on suppose que le plan dont il s'agit soit le cercle de la prunelle de l'œil, on en conclura que la lumière reçue par cet œil doit s'affaiblir dans le même rapport, à mesure qu'il s'éloigne du corps lumineux.

Concevons que l'œil placé d'abord à une certaine distance d'un flambeau, s'en écarte ensuite à une distance trois fois plus grande ; les rayons qui passaient par la prunelle, dans le premier cas, se répandront sur un espace neuf fois plus grand, d'où il suit que la prunelle en recevra neuf fois moins ; et par-conséquent si l'on voulait que l'impression faite sur l'œil fût toujours la même, il faudrait remplacer le premier flambeau par un autre, dont la lumière fût neuf fois plus forte, c'est-à-dire, neuf fois plus abondante sur un même espace.

De l'Ombre.

846. Un corps opaque ne peut jamais être éclairé qu'en partie par un corps lumineux, et l'espace privé de lumière,

qui est situé du côté de la partie non éclairée, est ce qu'on appelle *ombre*. Ainsi l'*ombre*, proprement dite, représente un solide, dont la forme dépend à la fois de celle du corps lumineux, de celle du corps opaque, et de la position de celui-ci à l'égard du corps lumineux.

847. Supposons que les deux corps soient des globes *r* et *z* (*fig.* 95), et que le diamètre du corps lumineux *r* soit plus grand que celui du corps opaque *z* : l'ombre sera un cône que l'on déterminera en supposant une ligne droite *oc* qui joigne les centres des deux globes, puis en menant une tangente *db* commune aux deux globes, jusqu'à la rencontre en *a* de cette même ligne prolongée. Si l'on conçoit que la tangente, en restant fixe par le point *a*, où elle coupe la ligne qui joint les centres, tourne autour de cette ligne, de manière à faire toujours le même angle avec elle, elle décrira évidemment la surface d'un cône qui aura pour base le cercle du globe opaque, terminé par tous les points de contact ; d'où l'on voit que la partie éclairée du globe opaque sera plus grande que la partie obscure, le plan qui distingue l'une de l'autre étant un des petits cercles de ce globe, situé dans l'hémisphère opposé à celui qui regarde le corps lumineux.

848. Si les deux globes sont égaux, l'ombre sera un cylindre d'une longueur indéfinie, et la partie éclairée du globe opaque sera un hémisphère ainsi que la partie obscure.

849. Si le globe opaque est plus gros que le globe éclairant, l'ombre deviendra un cône tronqué d'une longueur pareillement indéfinie, dont les points de contact avec le globe opaque seront sur la circonférence d'un de ses petits cercles, ensorte que la partie éclairée de ce globe sera moindre que sa partie obscure.

850. L'ombre, considérée sur un plan situé derrière le corps opaque qui la produit, n'est autre chose que la section de ce plan dans le solide qui représente l'ombre ; d'où il suit que, dans le cas des deux globes que nous avons cités pour exemple, la figure de l'ombre sur un plan sera un cercle, une ellipse ou quelqu'autre section conique, suivant les posi-

tions du plan à l'égard du cône d'ombre formé par l'interposition du corps opaque entre ce plan et le corps lumineux.

851. Lorsque l'ombre d'un corps est projetée sur un plan, elle ne succède point par un passage nettement tranché à la lumière qui éclaire les parties environnantes ; mais celle-ci éprouve une sorte de dégradation, au moyen de laquelle son intensité va toujours en diminuant, depuis les points le plus fortement éclairés, jusqu'à l'espace occupé par l'ombre pure, ou proprement dite. Soit de nouveau r (*fig.* 96.) le corps lumineux, z le corps opaque, et uy un plan situé derrière celui-ci ; px représentera la projection de l'ombre pure. Maintenant menons les lignes nl, qs, fh, etc., tangentes au globe opaque z, et qui aillent rencontrer le globe lumineux, et bornons nous à considérer ce qui se passe à la gauche du point p en allant vers u. La ligne fh, tangente aux deux globes, étant à la plus grande distance possible de p, parmi toutes les lignes susceptibles d'atteindre le globe r, il est facile de voir que le point f, et à plus forte raison les points plus reculés vers u, reçoivent autant de rayons que si le globe z n'existait pas ; savoir, tous ceux qui partent des points compris depuis h jusqu'en d ; mais que le point q ne reçoit aucun des rayons envoyés par les points situés entre h et s ; que le point m est privé de tous ceux qui ont pour origine les points compris entre h et l ; et qu'enfin, tous les rayons qu'envoie la partie du globe r, tournée vers le plan uy, sont perdus pour le point p ; d'où il suit que l'effet de la lumière décroît progressivement depuis f jusqu'en p, qui est la limite de l'espace px, occupé par l'ombre pure. On a donné le nom de *pénombre* à cette lumière graduellement décroissante, qui s'étend, d'une part, depuis f jusqu'en p, et d'un autre part, depuis g jusqu'en x. Les astronômes emploient la considération de la pénombre dans la théorie des éclipses, et nous en ferons usage, lorsque nous parlerons de la lumière décomposée par l'intermède du prisme.

852. L'ombre pure d'une verge perpendiculaire ou oblique sur un plan, est un triangle que l'on déterminera, en menant par le sommet de la verge une droite qui aille toucher le corps

lumineux, en faisant le plus petit angle possible avec la verge. Les côtés du triangle seront : 1°. la partie de cette droite, comprise entre le sommet de la verge et le plan donné ; 2°. la verge elle-même ; 3°. la ligne menée par le pied de la verge jusqu'à la rencontre de la droite dont nous avons parlé : cette dernière ligne sera l'ombre considérée sur le plan donné : elle croîtra et décroîtra à mesure que l'angle, dont le sommet se confond avec celui de la verge, sera plus ou moins grand, c'est-à-dire, à mesure que le corps lumineux s'abaissera ou s'élèvera par rapport au plan donné ; et si ce même corps s'écarte à droite ou à gauche de la position qu'avait d'abord le triangle qui détermine l'ombre, celle-ci fera sur le plan des mouvemens en sens contraire. C'est sur ces principes qu'est fondée la *gnomonique*, ou l'art de tracer des cadrans (1).

Vitesse de la Lumière.

853. On a cru pendant long-temps que le mouvement de la lumière était instantané ; mais cette opinion était uniquement fondée sur ce que la vîtesse de ce mouvement paraissait échapper à tous les moyens qu'on aurait pu employer pour la déterminer. Roëmer et Cassini découvrirent enfin une mesure de ce mouvement dans l'observation des éclipses du premier satellite de Jupiter : cette planète ayant un diamètre plus petit que celui du soleil, le cercle qui sépare sa partie éclairée de sa partie obscure est la base d'une ombre conique située vers cette dernière partie. Les satellites qui tournent autour

(1) On peut, au moyen de l'ombre projetée sur un terrain horizontal, mesurer à peu près la hauteur d'une tour ou d'un autre objet semblable. On plantera verticalement un bâton, dont on mesurera la partie élevée au-dessus du sol ; on mesurera aussi l'ombre de ce bâton et celle de la tour. Les longueurs des ombres étant proportionnelles aux hauteurs des deux objets qui les produisent, on aura la hauteur de la tour, en multipliant la longueur de son ombre par la hauteur du bâton, et en divisant le produit par la longueur de l'ombre du bâton.

de la planète principale entrent dans ce cône et en sortent successivement, de manière que leur partie éclairée devient elle-même obscure, et disparaît à mesure qu'ils se plongent dans le cône d'ombre, pour reparaître ensuite au moment où ils s'en dégagent. Supposons que la terre approche du terme où elle serait placée sur une même ligne droite entre Jupiter et le soleil ; dans ce cas, il s'écoulera environ 42 heures $\frac{1}{2}$ entre la fin d'une éclipse du premier satellite de Jupiter et celle de l'éclipse suivante. Concevons maintenant que la terre, en parcourant la moitié de son orbite, ait été se placer vers le point opposé, de manière qu'alors elle se trouve derrière le soleil, par rapport à Jupiter. Si la lumière n'avait aucun mouvement progressif, un spectateur situé sur la terre verrait le premier satellite de Jupiter sortir de l'ombre, après un temps égal à autant de fois 42 heures $\frac{1}{2}$ qu'il y aurait eu d'éclipses depuis le moment où la terre était entre Jupiter et le soleil. Mais il n'en est pas ainsi, et le spectateur voit, dans ce cas, la fin de l'éclipse environ 16 minutes plus tard que ne la donne le calcul ; de manière que, dans toutes les positions intermédiaires, la différence a toujours été en croissant jusqu'à cette limite. Or, le spectateur est alors à une distance de sa première position mesurée par le diamètre de l'orbite terrestre dont il a parcouru la moitié, et l'on sait que ce diamètre est d'environ soixante-dix millions de lieues. On en a conclu que la lumière emploie 16 minutes à parcourir cette distance, ce qui fait plus de quatre millions de lieues par minute. Ainsi la lumière qui nous vient immédiatement du soleil, ne parvient à nos yeux qu'au bout de huit minutes. C'est en combinant le mouvement progressif de la lumière, avec celui de la terre dans son orbite, que l'on explique l'aberration des étoiles, c'est-à-dire, le mouvement apparent qui les écarte du point auquel nous devrions les rapporter dans le ciel. D'après la vîtesse de la lumière, telle que nous venons de l'indiquer, on trouve, pour l'aberration, une quantité égale à celle que donne l'observation, ce qui garantit à-la-fois et la justesse de l'explication, et celle de la conséquence déduite du retard

que

que subissent les éclipses de Jupiter. Nous reviendrons dans la suite avec plus de détail sur le phénomène de l'aberration.

De l'Aurore Boréale.

854. Nous placerons ici la description d'un météore que les modernes ont appelé *aurore boréale*, et que nous ne considérons que comme un simple phénomène de lumière, dont la cause n'est pas encore bien connue. On trouve dans les anciens auteurs un grand nombre de passages, qui prouvent que ce phénomène avait été remarqué depuis très-long-temps. Chacun le décrivait à sa manière ; et, suivant les divers aspects sous lesquels il se présentait, on lui donnait différens noms, tels que ceux de *lampes*, de *torches ardentes*, de *lances*, etc. Ce n'est que dans le siècle dernier que l'on a commencé à l'étudier, d'après les règles d'une saine physique, et personne ne s'est plus attaché que Mairan à en déterminer les diverses circonstances, dont voici les principales (1). Ce phénomène se montre presque toujours du côté du Nord, en tirant un peu vers l'Ouest. Il commence ordinairement trois ou quatre heures après le coucher du soleil. Il s'annonce par une espèce de brouillard qui présente à peu près la figure d'un segment de cercle dont l'horizon forme la corde. La partie visible de sa circonférence paraît bientôt bordée d'une lumière blanchâtre, d'où résulte un arc lumineux, ou plusieurs arcs concentriques, dont la distinction est marquée par des bordures composées de la matière obscure du segment. Des jets et des rayons de lumière diversement colorés s'élancent ensuite de l'arc ou plutôt du segment nébuleux, où il se fait presque toujours quelque brèche éclairée, qui semble leur donner une issue. Quand le phénomène augmente et qu'il doit occuper une grande étendue, son progrès se manifeste par un mouvement

(1) Traité Physique et Historique de l'Aurore boréale, p. 115 et suiv.

général et une espèce de trouble dans toute la masse. Des brèches nombreuses se forment et disparaissent à l'instant dans l'arc et dans le segment obscur ; des vibrations de lumière et des éclairs viennnent frapper, comme par secousses, toutes les parties de la matière du phénomène, qui occupent l'hémisphère visible du ciel. Enfin, lorsque cette matière parvient à sa plus grande extension, il se forme au zénith une couronne enflammée, qui est comme le point central dans lequel tous les mouvemens d'alentour paraissent concourir. C'est là le moment où le phénomène se développe dans sa plus grande magnificence, tant par la variété des figures lumineuses qui se jouent de mille manières au haut de l'atmosphère, que par la beauté des couleurs dont plusieurs d'elles sont ornées. Le phénomène diminue ensuite par degrés, de manière cependant que les jets lumineux et les vibrations se renouvellent de temps en temps : mais enfin le mouvement cesse ; la lumière qui occupait les parties méridionales et celles de l'Orient et de l'Occident, se resserre et se concentre dans la partie boréale ; le segment obscur s'éclaircit et finit par s'éteindre, tantôt subitement, et tantôt avec lenteur, à moins qu'il ne se prolonge jusqu'à se fondre, en quelque sorte, dans le crépuscule du matin, comme cela a lieu dans la plupart des grandes aurores boréales.

855. Ce phénomène a été d'abord attribué aux vapeurs et aux exhalaisons de la terre, qui, après s'être mêlées, entraient en fermentation et finissaient par s'enflammer. D'autres ont imaginé que les glaces et les neiges de la zone polaire réfléchissaient les rayons solaires vers la surface concave des couches supérieures de l'atmosphère, d'où ces rayons étaient ensuite renvoyés vers nous, et produisaient toutes les apparences que présente l'aurore boréale. Quelques-uns ont considéré le fluide magnétique comme l'agent de ce phénomène, et la correspondance que l'on avait remarquée, dans certains cas, entre les apparitions de l'aurore boréale et les agitations de l'aiguille aimantée (789), semblait être favorable à cette opinion. Parmi les diverses causes dont on faisait dépendre le phénomène dont

il s'agit, l'électricité ne pouvait être oubliée, et le développement d'une théorie fondée sur cette cause appartenait, comme de droit, à Francklin. Suivant ce célèbre physicien, le fluide électrique transporté de l'Equateur vers les régions polaires, par les nuages qui en étaient chargés, descendait avec la neige sur la glace qui couvre ces régions, et après s'y être accumulé, remontait à travers l'atmosphère. Arrivé ensuite dans le vide qui était au-dessus, il se dirigeait du côté de l'Equateur, en divergeant comme les méridiens. Là il formait ces jets de lumière et toutes ces variétés de figures qu'on observe dans le spectacle d'une aurore boréale (1). Au reste, Francklin ne propose cette idée qu'en doutant ; et dans le premier ouvrage où il l'ait publiée, il finit par cette phrase qui renferme le jugement qu'il en portait lui-même : « cela pourrait » passer pour une explication de l'aurore boréale (2) ».

856. Mairan n'avait étudié, avec tant de soin, les circonstances de l'aurore boréale, que pour chercher à mieux étayer l'opinion particulière qu'il s'était formée sur l'origine de ce phénomène ; voici les principes sur lesquels était fondée cette opinion.

Diverses observations indiquent que le soleil est environné d'une atmosphère lumineuse par elle-même, ou seulement éclairée par les rayons de cet astre, et l'on a regardé cette atmosphère comme la cause d'un autre phénomène, qui porte le nom de *lumière zodiacale*. Cette lumière, qui est faible et blanchâtre, paraît surtout vers le printemps, quelque temps après le coucher du soleil, ou avant le lever, vers la fin de l'automne (3). Mairan suppose que l'aurore boréale a lieu, lorsque la matière de l'atmosphère solaire s'approche assez de la terre, pour etre plus en prise à l'attraction de cette planète qu'à celle du soleil. Une fois entrée dans la sphère d'activité

(1) Journal de Physique ; juin 1779, p. 409 et suiv.

(2) Expér. et Observ. sur l'Electricité ; Paris, 1752, p. 118.

(3) Mairan, Traité de l'Aurore boréale, p. 12.

de la terre, elle tombe dans notre atmosphère, et bientôt le mouvement circulaire plus rapide des particules d'air situées vers l'Equateur, la repousse vers les pôles où la vîtesse de rotation est moindre. C'est pour cela que l'aurore boréale paraît le plus souvent du côté du Nord. Mairan s'efforce ensuite d'expliquer, d'après les mêmes principes, toutes les circonstances du phénomène.

Comme la position de l'aurore boréale, qui, selon Mairan, a son siége dans l'atmosphère, est quelquefois élevée à plus de 260 lieues au-dessus de la surface de la terre (1), ce physicien avait été obligé de supposer à cette atmosphère une hauteur incomparablement plus grande que celle qu'on lui attribuait communément. L'objection lui en fut faite par le célèbre Euler, qui en même temps proposa, sur la cause des aurores boréales, une nouvelle opinion (2) que Mairan, à son tour, s'efforça de combattre (3). Suivant cette opinion, les rayons solaires, exerçant leur impulsion sur les particules de l'atmosphère, les chassent à une grande distance, et les rendent lumineuses, en se réfléchissant sur leur surface. Euler étendait cette explication à l'apparition des queues des comètes, et à celle de la lumière zodiacale, en vertu d'une impulsion semblable, qui agissait, d'une part, sur l'atmosphère des premières, et de l'autre, sur celle du soleil lui-même.

D'après les détails dans lesquels nous venons d'entrer, il semble que toutes les hypothèses aient été épuisées pour expliquer l'aurore boréale. Parmi les différentes causes qui en ont été assignées, on pourrait être tenté de donner la préférence à l'électricité ; mais jusqu'ici cette préférence n'est fondée sur aucune observation décisive, et l'incertitude qui reste encore sur tout ce qui concerne le phénomène dont il s'agit, sera une

---

(1) Mairan, Traité de l'Aurore boréale, p. 62.

(2) Recherches Physiques sur la cause des queues des comètes, de la lumière boréale et de la lumière zodiacale; Mémoires de l'Académie de Berlin, 1746, t. II.

(3) Traité de l'Aurore boréale; septième éclaircissement, p. 341 et suiv.

nouvelle preuve que ce qu'il y a de plus anciennement connu n'est pas toujours ce qui l'est le mieux.

2. De la Réflexion et de la Réfraction de la Lumière.

Après avoir exposé la manière dont se propage le fluide lumineux, lorsque ses molécules libres au milieu de l'espace, suivent constamment la route qu'elles ont prise, en partant du corps qui les a lancées, nous avons maintenant à considérer les changemens que subit le même fluide, dans la direction de son mouvement, à la rencontre des corps qui se présentent sur son passage.

Loi de la Réflexion.

857. Lorsqu'un rayon de lumière, au moment où il arrive à la surface d'un corps, se replie vers le milieu qu'il avait traversé, cette déviation se nomme *réflexion*. L'angle formé par la première direction du rayon avec un plan tangent au point de la surface où le rayon la rencontre, est ce qu'on appelle l'*angle d'incidence ;* et l'angle formé par la nouvelle direction du rayon avec le même plan, se nomme l'*angle de réflexion*. L'observation prouve que l'angle de réflexion est toujours égal à l'angle d'incidence.

Réflexion sur les Surfaces planes.

858. Il suit de ce qui vient d'être dit que si des rayons parallèles entre eux rencontrent, sous un angle quelconque, une surface réfléchissante qui soit plane, ils resteront parallèles après leur réflexion.

859. Si les rayons, au lieu d'être parallèles, sont convergens ou divergens, la surface réfléchissante étant toujours plane, ils conserveront, après leur réflexion, le même degré de con-

vergence ou de divergence : par exemple, dans le cas où les rayons sont convergens, on peut considérer l'ensemble des rayons incidens comme un cône tronqué, et les rayons réfléchis comme formant la partie détachée du cône, qui s'est placée au-dessus de la surface réfléchissante, de manière que sa base continue de se confondre avec la plus petite base du cône tronqué. Il est facile d'appliquer cette considération aux rayons divergens. On voit par là que, dans la réflexion sur les surfaces planes, les rayons ne font que changer de route, sans que leur position respective soit dérangée. Il n'en est pas de même de la réflexion sur les surfaces courbes : elle fait varier à la fois les directions et les positions respectives des rayons.

Réflexion sur les Surfaces concaves.

860. Concevons que la surface réfléchissante (*fig.* 97) soit concave et fasse partie d'une surface sphérique : soient *hm*, *ac* deux rayons incidens parallèles; ayant mené les tangentes *tms*, *ocy*, aux points d'incidence, et par le point *c*, la sécante *nz* parallèle à *ts*, nous remarquerons que si l'incidence du rayon *ac* se faisait sur la sécante *nz*, *mg* étant le rayon réfléchi qui appartient au rayon incident *hm*, la ligne *ck* parallèle à *mg* serait le rayon réfléchi, relatif au rayon incident *ac*. Si l'on considère maintenant l'incidence du rayon *ac* sur la tangente *oy*, il est évident que l'on aura l'angle *kcy* plus petit que l'angle d'incidence *aco*. Donc pour donner à *ck* la position qui convient à la réflexion sur *oy*, il faut augmenter l'angle *kcy*, et parconséquent le rayon réfléchi, tel que *cb*, convergera avec *mg*, et ira le couper.

861. Supposons que *ac*, en restant fixe par l'extrémité *c*, s'écarte du rayon *mh* par son extrémité *a*, auquel cas les rayons incidens convergeront entre eux : l'angle d'incidence *aco* étant augmenté, il faudra que l'angle de réflexion *bcy* augmente aussi ; d'où il suit que les rayons réfléchis convergeront davantage que les rayons incidens, puisque ceux-ci sont partis du

parallélisme où la convergence était nulle, tandis que *cb* convergeait déjà avec *mg*.

Si, au contraire, *ac* se rapproche de *hm* par son extrémité *a*, auquel cas les rayons incidens divergeront, alors l'angle d'incidence *aco* se trouvant diminué, l'angle de réflexion *bcy* diminuera aussi; d'où il suit que les rayons réfléchis *mg*, *cb*, convergeront toujours de moins en moins, à mesure que *ac* s'inclinera vers *hm*, de manière qu'à un certain terme *mg* et *cb* deviendront parallèles, et qu'au-delà de ce terme ils seront eux-mêmes divergens, quoique d'une moindre quantité que les rayons incidens qui sont partis du parallélisme.

Tout ce que nous venons de dire renferme le développement et la preuve des principes suivans : la réflexion sur les surfaces concaves sphériques rend convergens les rayons qui étaient parallèles avant leur incidence ; elle augmente la convergence de ceux qui convergeaient déjà ; et quant à ceux qui divergeaient, elle peut, suivant les circonstances, les rendre convergens, ou parallèles, ou mêmes divergens, quoique toujours moins que les rayons incidens.

Foyer des Rayons parallèles.

862. Considérons maintenant la réflexion de deux rayons incidens *ns*, *rp* (*fig.* 98) parallèles soit entre eux soit au rayon *ac* de la sphère à laquelle appartient la surface réfléchissante, et situés à égales distances de ce dernier rayon ; ayant mené un second rayon *cs* au point d'incidence du rayon *ns*, nous aurons l'angle *csn* égal à l'angle *csm*, puisque ces angles sont les complémens des angles d'incidence et de réflexion *nsy* et *mst* ; de plus, à cause de *ns* parallèle à *ca*, l'angle *csn* est égal à *scm* ; donc le triangle *cms* est isocèle, d'où il suit que *ms* est égal à *cm* ; et puisque *ms* est plus grande que *ma*, on aura aussi *cm* plus grande que *ma* ; donc les rayons parallèles *ns*, *rp* se réfléchiront toujours dans un point situé en dessous de la moitié supérieure *cf* du rayon *ca*.

Or, si l'on suppose que les rayons *ns*, *rp* se rapprochent, par des degrés égaux, du rayon de la sphère, le point *m*, où se fait la réflexion, se rapprochera aussi du point *f*, ensorte que quand ils ne seront plus qu'à une distance infiniment petite de *ca*, le point où ils se réfléchiront se confondra sensiblement avec le point *f*.

863. D'une autre part, si l'on conçoit différens rayons incidens *ns*, *db*, *ki*, etc. (*fig.* 99), tous parallèles à l'axe et également distans les uns des autres, les angles d'incidence de ceux qui sont sensiblement éloignés de l'axe, différeront beaucoup plus entre eux, à mesure qu'ils s'en écarteront, que ceux des rayons voisins du même axe, parceque les inclinaisons des petits arcs sur lesquels tombent les premiers rayons vont en croissant rapidement, au lieu que dans le voisinage de l'axe, les arcs s'écartent peu de la direction perpendiculaire à l'égard des rayons qui leur correspondent. Il suit de là que dans un faisceau de rayons qui tombent parallélement au rayon de la sphère sur la courbure *oag*, tous ceux qui sont peu distans de l'axe concourent après leur réflexion sur un très-petit espace situé à peu près au milieu *f* du rayon de la sphère. On considère ce petit espace comme un point que l'on appelle *le foyer des rayons parallèles*, et dont nous exposerons dans la suite les propriétés.

Foyer des Rayons divergens.

864. Le raisonnement que nous venons de faire à l'égard d'un faisceau de rayons parallèles, qui n'aurait qu'une très-petite épaisseur, peut s'appliquer, jusqu'à un certain point, à un cône délié de rayons incidens tels que *rs*, *rm* (*fig.* 100), qui partiraient d'un point *r* de l'axe, pris au-dessus du centre, et dont les directions faisant entre elles de très-petits angles, approcheraient elles-mêmes beaucoup du parallélisme. Dans ce cas, les rayons réfléchis *sf*, *mf*, et tous les autres qui font partie du cône, concourent encore assez sensiblement en *f*, sur un petit espace, que l'on peut regarder aussi comme une

espèce de foyer, et il est facile de juger que la position de ce foyer doit varier en même temps que celle du point r.

Réciproquement, si l'on suppose que le cône de lumière parte de l'un des foyers f, qui ont lieu dans l'hypothèse que nous venons de faire, le point r deviendra, à son tour, le foyer relatif à f considéré comme point de départ. Ces résultats que nous reprendrons dans la suite avec plus de détail, nous seront utiles pour mieux concevoir les phénomènes que présentent les miroirs concaves (1).

Réflexion sur les Surfaces convexes.

865. Tous les effets précédens ont lieu en sens contraire dans la réflexion sur les surfaces convexes qui font partie de celle d'une sphère ; car, si l'on prolonge derrière la surface concave les rayons incidens et les rayons réfléchis qui ont rapport à cette dernière surface, on aura la répétition des mêmes angles d'incidence et de réflexion, relativement à la

---

(1) La position du foyer dont il s'agit ici peut être facilement déterminée à l'aide du calcul. Pour y parvenir, nous allons considérer la chose d'une manière plus générale, qui trouvera aussi son application dans l'exposé des effets produits par les mêmes miroirs. Soient rn, rm (*fig.* 101) deux rayons incidens qui rencontrent la surface concave tgq sous des directions quelconques, pourvu qu'elles fassent entre elles un angle presque infiniment petit. On propose de déterminer le point de concours f des rayons réfléchis ne, my.

Menons le rayon cn, puis les sinus ch, ce des angles égaux cnr, cnu, et divisons en deux également les cosinus nh, ne, aux points l, i. Menons aussi nx perpendiculaire sur rn, et nz perpendiculaire sur ym prolongée.

Les petits triangles nxm, nzm ont chacun un angle droit, l'un en x, l'autre en z. De plus, $nmz = fmq = xmn$. Donc les deux triangles, ayant de plus une hypoténuse commune mn, sont semblables et égaux.

De plus, les triangles rhs, rxn sont semblables, ainsi que les triangles fsn, fey. Enfin cs et cy pouvant être prises, sans erreur sensible, pour les sinus des angles égaux cms, cmy, leurs différences avec les sinus égaux ch, ce sont égales ; donc $sh = ey$.

Cela posé, nous aurons d'une part, $rn : rs$ ou $rh :: nx : hs$; et d'une autre part, $nf : fe :: nz : ey$. Mais $nz = nx$, et $hs = ey$. Donc $rn : rh$

convexité de la même surface, sur des tangentes communes, avec cette différence, que les rayons qui étaient considérés comme convergens dans le premier cas, seront censés diverger dans le second, et réciproquement. Par exemple, si l'on prolonge derrière la surface *ucz* (*fig.* 102) les rayons *hm*, *ac*, *gm*, *bc*, les rayons incidens relatifs à la convexité de la surface seront $h'm$, $a'c$, parallèles entre eux comme les premiers, et les rayons réfléchis seront mg', cb', qui divergeront entre eux.

866. D'après cela les principes relatifs à la réflexion sur les surfaces convexes sphériques se déduisent de ceux qui ont rapport à la réflexion sur les surfaces concaves, par une simple inversion de termes, ensorte qu'ils doivent être ainsi énoncés. La réflexion sur les surfaces convexes rend divergens les rayons qui étaient parallèles avant leur incidence; elle augmente la divergence de ceux qui divergeaient déjà, et à l'égard de ceux qui convergeaient, elle peut, suivant les circonstances, les rendre divergens, ou parallèles, ou même convergens, quoique dans un moindre degré que les rayons incidens.

867. Dans le même cas, la réflexion des rayons parallèles

:: $nf : fe$; ou bien, $rn + rh : rn :: nf + fe : nf$; ou $rn + rn - nh : rn :: ne : nf$.

Soit $rn = a$, nh ou $ne = b$, la proportion deviendra $2a - b : a :: b : nf = \frac{ab}{2a - b}$.

Si le miroir était convexe vers le point r, on aurait, $nf = \frac{ab}{2a + b}$.

Si l'on suppose que la ligne nr, en restant fixe par le point n, s'approche du rayon cn jusqu'à coïncider avec lui, la ligne un tombera aussi sur cn, et les points r, f seront sur la direction de ce même rayon, comme on le voit *fig.* 100. Alors l'angle d'incidence cnr (*fig.* 101) devenant nul, son cosinus nh est égal au rayon cn. Soit $cn = d$; nous aurons (*fig.* 100), $nf = \frac{ad}{2a \mp d}$.

Dans le même cas, si l'on conçoit que le point r s'éloigne à l'infini, la quantité d s'évanouit devant $2a$, et l'on a $nf = \frac{d}{2}$, ce qui est le même résultat auquel nous sommes déjà parvenus (862), relativement au point f considéré comme foyer des rayons parallèles.

entre eux et à l'axe avant leur incidence, se fera toujours de manière que si l'on prolonge les rayons réfléchis, en dessous de la convexité, ils iront se réunir en un point situé entre le milieu du rayon de la sphère et le point où ce rayon coupe la surface réfléchissante; et en appliquant ici le raisonnement que nous avons fait par rapport à la réflexion sur une surface concave, on en conclura que dans un faisceau de rayons qui tombent sur une surface convexe, parallélement entre eux et à l'axe, ceux qui seront voisins de cet axe tendront à se réunir en un foyer imaginaire, situé à peu près à la moitié du rayon de la sphère.

Loi de la Réfraction.

868. Lorsque la lumière rencontre un corps diaphane qui lui donne accès dans son intérieur, elle subit une autre espèce de déviation, dont nous allons pareillement exposer les lois. Ces corps, que la lumière pénètre, portent en général le nom de *milieu*. Le point par lequel un rayon de lumière entre dans un milieu, s'appelle *point d'immersion;* et celui par lequel il en sort, s'appelle *point d'émergence*. Si le rayon rencontre perpendiculairement la surface d'un milieu, il continue sa route dans ce milieu; mais si l'incidence est oblique à la surface du milieu, le rayon se détourne de sa route, ensorte qu'il paraît rompu au point d'immersion : ce détour s'appelle *réfraction*, et la partie du rayon qui le subit se nomme *rayon rompu* ou *rayon brisé*. L'*angle d'incidence* est celui que fait le rayon incident avec une perpendiculaire menée par le point d'immersion sur la surface du milieu, et l'*angle de réfraction* est celui que fait le rayon rompu avec la même perpendiculaire.

869. Cela posé, il peut arriver que la lumière passe d'un milieu plus rare dans un milieu plus dense, ou d'un milieu plus dense dans un milieu plus rare. Dans le premier cas, le rayon rompu se rapproche de la perpendiculaire au point d'immersion, et dans le second il s'en écarte. De plus, l'observation prouve que le sinus de l'angle d'incidence et celui de l'angle

de réfraction sont en rapport constant, lorsque le milieu que quitte la lumière et celui où elle entre restent les mêmes, quelle que soit l'obliquité du rayon incident. Si la lumière passe de l'air dans le verre, le sinus d'incidence sera à celui de réfraction comme 3 est à 2; si elle passe de l'air dans l'eau, le rapport sera celui de 4 à 3.

Le même rapport a lieu en sens contraire, lorsque la lumière se réfracte de nouveau au point d'émergence en rentrant dans le premier milieu, c'est-à-dire, que si le retour se fait du verre dans l'air, le rapport des sinus sera celui de 2 à 3, et s'il se fait de l'eau dans l'air, le rapport sera celui de 3 à 4.

870. Il suit de là que si les deux surfaces du milieu que la lumière traverse de part en part sont parallèles entre elles, la lumière, en repassant dans le milieu environnant, prendra une direction qui sera elle-même parallèle à celle du rayon incident. Plusieurs substances minérales ont la propriété singulière de solliciter le rayon qui les pénètre à se diviser en deux parties qui suivent deux routes différentes : c'est ce que l'on appelle *double réfraction;* nous reviendrons dans la suite sur cette propriété, et nous essayerons d'en donner la théorie, relativement au minéral connu sous le nom de *spath d'Islande*, qui se prête plus facilement que les autres à l'observation du phénomène.

Réfraction dans les milieux terminés par des Surfaces courbes.

871. On peut considérer une surface courbe comme un assemblage d'une infinité de petits plans diversement inclinés entre eux. Lorsqu'un cône de lumière tombe sur une portion d'une de ces surfaces, et que le corps auquel appartient celle-ci est diaphane, chaque rayon subit à l'égard du petit plan qui le reçoit, une réfraction soumise à la loi que nous venons d'exposer. Mais à cause des inclinaisons respectives de tous les petits plans qui composent la surface réfringente, les rayons

réfractés prennent, les uns à l'égard des autres, des positions qui dépendent de la figure du milieu, et, suivant les circonstances ils tendent vers un même point, par des directions convergentes, ou divergent plus fortement que les rayons incidens. C'est en étudiant ces différentes marches de la lumière ainsi réfractée, que les opticiens sont parvenus à construire ces instrumens si utiles, à l'aide desquels les rayons envoyés par un corps que l'œil abandonné à lui-même ne pourrait distinguer, arrivent à cet organe dans le même ordre que si l'objet était venu se mettre à sa portée, et le lui rendent visible, en le lui montrant où il n'est pas.

Cas où le milieu est terminé par une seule Surface courbe.

872. Soit *mhn* (*fig.* 103) une portion de surface sphérique, et soient *sk*, *st* deux rayons incidens partis d'un point *s* pris sur le prolongement de l'axe *ch*. Supposons que ces rayons soient très-voisins du même axe, et fassent avec lui des angles égaux. Les perpendiculaires *ug*, *zl*, aux points d'immersion, sont nécessairement sur les prolongemens de deux rayons du cercle auquel appartient l'arc *mhn*, et dont le centre est en *c*; donc ces perpendiculaires convergent vers l'axe *ch*, et si nous supposons que le milieu M dont la matière de la sphère est composée soit plus dense que le milieu E parcouru par les rayons incidens, il est facile de voir que les rayons rompus *kx*, *tq*, en se rapprochant des perpendiculaires, se rapprocheront aussi de l'axe. De plus, si le point *s* est à une distance convenable de la surface *mhn*, les mêmes rayons convergeront vers un point *f* de l'axe où ils se réuniront. Tous les autres rayons partis du point *s* que l'on appelle le *point radieux*, et qui composent avec les précédens une cône infiniment délié, dont la base a le point *h* pour centre, et le petit arc *kt* pour diamètre, convergeront de même les uns vers les autres, ensorte qu'il se formera derrière la surface *mhn* un nouveau cône opposé au premier par sa base, et dont le sommet sera en *f*. A

la rigueur, ce sommet est plutôt un espace, dont le point f fait partie, mais qui est censé, à cause de sa petitesse se confondre avec ce point que l'on nomme le *foyer* des rayons partis du point radieux s.

873. C'est principalement sur la considération des foyers qu'est fondée la construction des instrumens d'optique, parceque les images que nous observons, à l'aide de ces instrumens, ne sont autre chose que des assemblages de foyers, qui proviennent des points radieux situés à la surface des mêmes objets; d'où il résulte que les distances entre ces points et les verres auxquels ils envoient des rayons, varient continuellement, à mesure que le spectateur change de position, ou qu'il observe successivement divers objets plus ou moins éloignés.

874. Concevons, par exemple, que le point s étant d'abord dans la position que représente la figure, se trouve transporté en s' (*fig.* 104), à une plus grande distance de la surface réfringente. Les rayons incidens $s'k'$, $s't'$, étant toujours censés former des angles presque infiniment petits avec l'axe $s'h'$, il en résulte que pendant les divers mouvemens que peut faire le point s', en s'écartant plus ou moins sensiblement de la surface réfringente, le petit arc $k't'$ ne varie que d'une quantité extrêmement petite; et, par une suite nécessaire, les rayons incidens $s'k'$, $s't'$ divergent moins entre eux que les rayons sk, st (*fig.* 103). Donc les premiers faisant avec les perpendiculaires aux points k', t' (*fig.* 104), de plus petits angles que quand le point radieux était en s (*fig.* 103), les rayons réfractés $k'f'$, $t'f'$ (*fig.* 104) qui leur correspondent, seront aussi plus voisins des mêmes perpendiculaires que les premiers. Ils convergeront donc davantage l'un vers l'autre, ensorte que le foyer f' qu'ils formeront, en se réunissant soit entre eux, soit avec les autres rayons, sera situé à une plus petite distance de la surface réfringente que le foyer f (*fig.* 103).

875. A mesure que le point s' s'écartera de la surface $mh'n$, le foyer f' (*fig.* 104) se rapprochera de plus en plus de la même surface. Ce mouvement atteindra sa limite, lorsque le point radieux s' étant à une distance de la surface réfringente que

l'on puisse regarder comme infinie, les rayons incidens $s'k'$, $s't'$ seront censés être parallèles entre eux. Cette supposition a lieu à l'égard des objets très-éloignés que l'on observe à l'aide d'un instrument d'optique.

876. Reprenons le cas où le point radieux était situé en s, (*fig.* 103) et supposons que ce point s'approche au contraire de la surface réfringente. Un raisonnement analogue à celui que nous avons fait par rapport au cas précédent, prouvera que le nouveau foyer doit se former alors au-delà du foyer f. A mesure que la distance diminuera entre le point s et la lentille, les rayons réfractés convergeront toujours moins entre eux; il y aura un terme où ils deviendront parallèles, de manière que le foyer s'évanouira, et passé ce terme ils divergeront, comme on le voit (*fig.* 105), quoique d'une moindre quantité que les rayons incidens (1). Alors il faudra les prolonger en dessus de la surface réfringente, pour avoir leur point de réunion, qui se trouvera en f, du même côté que le point radieux s, mais à une plus grande distance de la même surface. On donne, dans ce cas, au point f, le nom de *foyer virtuel* ou de *foyer imaginaire*, pour le distinguer du *foyer réel*, qui

---

(1) On parvient facilement, par le calcul, à des formules générales, qui représentent ces différens cas. Soit st (*fig.* 106) le même rayon incident que *fig.* 103. Il s'agit de déterminer la distance du point f à la surface réfringente, en supposant d'abord que le rayon réfracté tq converge vers l'axe. Si nous menons cd (*fig.* 106) perpendiculaire sur tq, et cc perpendiculaire sur le prolongement du rayon incident st, l'angle etc étant égal à l'angle d'incidence stz, et l'angle ctd étant l'angle de réfraction, cc et cd seront les sinus de ces angles. Soit $ce = 1$, $cd = m$, $sh = b$ et $hc = a$. Les triangles semblables sht, sec donnent $ht : ce :: sh : sc = cs$, à cause de la petitesse de l'angle cse; ou bien, $ht : 1 :: b : b + a$. D'une autre part, les triangles semblables fht, fdc donnent $ht : cd :: ft = fh : cf$; ou bien $ht : m :: cf + a : cf$. Donc $\frac{b}{b+a} = m\left(\frac{cf+a}{cf}\right)$, ou $\frac{b}{m(b+a)} = \frac{cf+a}{cf}$. Donc $cf + a : cf :: b : m(b+a)$, et $cf + a : cf + a - cf :: b : b - mb - ma$; d'où l'on tire, $cf + a$ ou $fh = \frac{ab}{(1-m)\ b-ma}$.

Le résultat précédent a lieu, toutes les fois que $(1-m)b$ est plus grand

a une existence physique, déterminée par la réunion effective des rayons réfractés.

Le point s continuant de s'approcher de la surface réfringente, la divergence des rayons réfractés augmentera, d'où il est facile de conclure que pendant le mouvement du point s, le foyer imaginaire se placera aussi toujours plus près de la même surface.

877. On voit par ce qui précède, que quand le point radieux et le foyer sont situés de deux côtés opposés de la surface réfringente, la distance du foyer à cette surface décroît, à mesure que celle du point radieux augmente, et réciproquement; mais si le foyer est placé du même côté que le point radieux, les deux distances croissent et décroissent en même temps. On peut généraliser davantage cet énoncé, en disant que les mouvemens du point radieux et du foyer ont toujours lieu suivant la même direction, quelles que soient les positions de ces points, par rapport à la surface réfringente.

878. Nous ajouterons ici la démonstration d'un cas particulier, qui a lieu quelquefois dans la vision, à l'aide des instrumens d'optique. Supposons que les rayons incidens yk, st (*fig.* 108) étant parallèles, rencontrent la surface mn sous différens degrés d'obliquité, de manière que l'un soit en dedans, et l'autre en dehors de l'intervalle entre les perpendiculaires ug, zl. Les rayons réfractés kx, tq convergeront encore l'un

---

que ma. Mais si ces quantités sont égales, alors le dénominateur $(1-m)b-ma$ devenant zéro, la quantité $cf+a$ devient infinie. C'est le cas où les rayons rompus sont parallèles entre eux.

Si $(1-m)b$ est plus petit que ma, alors le rayon réfracté tq diverge à l'égard de l'axe, comme on le voit *fig.* 105. En même temps le point f se trouve transporté du côté opposé, c'est-à-dire, en dessus de l'arc mn, et la formule devient $fh=\frac{ab}{(m-1)b+am}$, où les signes se trouvent changés dans le dénominateur. On peut vérifier cette formule, en appliquant à la figure 106 le calcul relatif à la figure 105.

Dans le cas où les rayons incidens sont parallèles, sh ou b devenant infinie, am s'évanouit, et l'on a $cf+a=\frac{ab}{(1-m)b}=\frac{a}{1-m}$.

vers

vers l'autre. Pour le prouver, imaginons que les rayons *yk*, *st* tombent d'abord sur deux petites surfaces planes *de*, *ab* (*fig.* 109, Pl. 7), qui soient de niveau ; il est évident que les rayons rompus *kx*, *tq* seront parallèles. Concevons maintenant que la petite surface *ab* tourne autour du point d'immersion *t*, de manière à prendre la position *a'b'*, et qu'en même temps la perpendiculaire *zl* tourne d'une quantité égale, en passant à la position *z'l'*, tandis que les rayons *st* et *tq* resteront fixes; les deux petites surfaces *de*, *a'b'* pourront être alors considérées comme faisant partie d'une surface courbe. Or l'angle d'incidence *stz* sera augmenté de la quantité *ztz'*, et l'angle de réfraction *ltq* le sera d'une quantité égale *ltl'*, et il est clair que si les sinus variaient comme les angles, le sinus de réfraction serait trop augmenté pour que le rapport restât le même. Par exemple, si ce rapport était celui de 3 à 2, l'accroissement de l'angle de réfraction ne devrait être que les $\frac{2}{3}$ de celui de l'angle d'incidence, au lieu de lui être égal. Mais le sinus de réfraction se trouve encore plus augmenté à proportion de celui d'incidence, que dans l'hypothèse précédente ; parceque si l'on augmente deux angles de la même quantité, le sinus du plus petit angle croîtra dans un plus grand rapport que celui du plus grand angle : donc, pour que le rapport entre les sinus reste le même, il faut que l'angle *l'tq* diminue, et par-conséquent le rayon rompu *tq* se rapprochera de la nouvelle perpendiculaire *tl'*, c'est-à-dire qu'il convergera vers l'autre rayon rompu *kx*.

879. Si le milieu M (*fig.* 110) est plus rare que le milieu E, il est facile de voir que les rayons rompus *kx*, *tq*, faisant avec les perpendiculaires *ug*, *zl*, des angles plus ouverts que ceux d'incidence, divergeront encore plus que les rayons incidens *sk*, *st*. Il y aura, dans ce cas, un foyer imaginaire situé en *f'*, c'est-à-dire plus près de la surface réfringente que le point radieux, et si l'on suppose que le point *s* fasse des mouvemens d'un côté ou de l'autre de sa position actuelle, on concevra, avec un peu d'attention, que ceux du foyer doivent avoir lieu encore ici dans la même direction. Par exemple, si le point

radieux *s* s'écarte de la surface réfringente, les angles *skt*, *stz* étant diminués, les angles de réfraction *gkx*, *ltq* le seront aussi, d'où il suit que les prolongemens des rayons *xk*, *qt* iront couper l'axe au-dessus du point *f'*. Lorsque le point radieux est à une distance censée infinie par rapport à la surface réfringente, les rayons réfractés divergent encore, quoique d'une moindre quantité que dans les cas précédens.

880. Si le milieu réfringent M est concave, comme on le voit *fig.* 111, et en même temps plus rare que le milieu E, les rayons réfractés *kx'*, *tq*, divergeront plus que les rayons incidens *sk*, *st*, et ainsi leur divergence continuera d'exister, quoique dans un degré moins sensible, au terme où les rayons incidens deviendront parallèles. Dans ce dernier cas, ainsi que dans chacun des cas précédens, le foyer sera imaginaire et situé du même côté que le point radieux ; et les mouvemens de l'un et l'autre point se correspondront aussi, quant à leur direction. Si le premier milieu est au contraire plus dense que le second, les rayons réfractés s'écartant plus des perpendiculaires que les rayons incidens, divergeront moins après leur réfraction, ou seront parallèles, ou deviendront même convergens. On conçoit que ce dernier cas doit avoir nécessairement lieu, lorsque le point radieux étant censé à une distance infinie de la surface réfringente, les rayons incidens sont parvenus au parallélisme. Il sera facile d'appliquer encore aux différentes circonstances que nous venons d'énoncer, le principe relatif aux mouvemens du foyer comparés avec ceux du point radieux (877).

Cas où le Milieu est terminé par deux Surfaces courbes opposées.

881. Concevons une seconde surface courbe *mln* (*fig.* 112), qui ait le même axe que la première *mhn*, et soit située de manière que les deux concavités se regardent, auquel cas le milieu M prend le nom de *lentille*. Si ce milieu est plus dense que le milieu environnant E, et que le point radieux *s* soit à

une telle distance de la lentille, que les rayons réfractés kx, tq convergent l'un vers l'autre, il est aisé de voir que les rayons émergens convergeront encore davantage, en s'écartant des perpendiculaires aux points x, q, et ainsi le point f, dans lequel ils se réuniront sur l'axe de la lentille sera plus voisin de la surface mln, que dans le cas où les rayons kx, tq auraient continué leur route, sans aucune déviation (1).

882. Si le point s vient à s'écarter de la lentille, la convergence des rayons réfractés augmentera (874), et cette circonstance déterminera le point f à s'approcher continuel-

(1) Soit mn (*fig.* 113) une lentille d'une matière plus dense que le milieu environnant, et st un rayon très-voisin de l'axe, qui après s'être réfracté suivant tt' dans la lentille, en convergeant avec l'axe, repasse dans le milieu environnant suivant une direction $t'f$. Voici comment on peut déterminer la distance hf de ce point à la lentille, en supposant que celle-ci soit assez mince pour que son épaisseur puisse être négligée.

Prolongeons tt' jusqu'à ce qu'elle rencontre l'axe en f'. Soient c, c' les centres des deux courbes, que l'on peut supposer, si l'on veut, appartenir à deux sphères différentes. Soit toujours $sh = b$ et $hc = a$. Le point f' étant le point de concours des rayons partis de s, dans l'hypothèse où la convexité mhn existerait seule, nous aurons, comme ci-dessus (876), $f'h = \frac{ab}{(1-m)b-ma}$.

Soit maintenant $c'h' = c$, et $fh' = z$. Pour avoir une seconde valeur de $f'h$ qui renferme z, considérons le rayon ft' comme allant du point f vers la surface convexe $mh'n$, pour se réfracter dans le milieu M, suivant une direction $t't$ qui diverge par rapport à l'axe. Ce cas sera semblable à celui de la figure 105, et ainsi f' (*fig.* 113) sera le point où le rayon réfracté rencontre l'axe, en se plaçant du même côté que le rayon incident. Or, nous avons eu (876) dans ce dernier cas, $fh = \frac{ab}{(m-1)b+am}$. Mais ici fh (*fig.* 105) devient $f'h'$ (*fig.* 113) ou son égale $f'h$; a devient c, et b devient z. Donc la formule se change en celle-ci, $f'h = \frac{cz}{(m-1)z+cm}$. Egalant les deux valeurs de $f'h$, on a $\frac{cz}{(m-1)z+cm} = \frac{ab}{(1-m)b-ma}$, d'où l'on tire, $z = \frac{mabc}{(1-m)(bc+ab)-mac}$.

Si les deux surfaces appartiennent à des sphéricités égales, on aura $c = a$, et la formule sera $z = \frac{mab}{(1-m)2b-ma}$.

lement de la surface *mln*. Lorsque le point *s* est à une distance infinie de la lentille, le foyer *f* (*fig.* 114) prend le nom de *foyer des rayons parallèles*, relatif à la position respective des rayons incidens (1). On l'appelle aussi *foyer principal*, ou simplement *foyer*, parcequ'il répond à la limite, où les rayons émergens approchent le plus de se réunir exactement dans un point unique.

883. Remettons le point radieux *s* dans la situation indiquée par la figure 112, et supposons qu'il la quitte pour s'approcher de la lentille. Les rôles alors étant changés, le point *f* à son tour fuira la lentille de plus en plus. A un certain terme, les rayons *xf*, *qf* arriveront au parallélisme, et si le point radieux continue de se mouvoir vers la lentille, les mêmes rayons commenceront à diverger, et leur foyer deviendra imaginaire. Si la lentille était au contraire d'une matière moins dense que le milieu environnant, on aurait des effets différens, qui ont été pareillement déterminés par les physiciens.

884. Tout ce que nous avons dit (877) de la correspondance entre les mouvemens du point radieux et du foyer, lorqu'il n'y a qu'une seule surface réfringente, s'applique également au cas où le milieu est d'une forme lenticulaire. Ces mouvemens se font toujours dans le même sens, soit que les deux points interceptent la lentille, ou que le foyer se trouve du même côté que le point radieux.

885. On peut aussi supposer que le corps diaphane soit *biconcave*, c'est-à-dire que ses deux surfaces se regardent par leurs convexités, ou qu'il soit concave d'un côté et convexe de l'autre, auquel cas il prend le nom de *menisque*, ou enfin qu'il soit *plan convexe* ou *plan concave*. Ces diverses configurations combinées avec la différence de densité qui peut exister entre les deux milieux, ont conduit à une multitude de résul-

---

(1) Dans ce cas, la quantité *ma* s'évanouit dans le dénominateur, et la formule devient $s = \frac{ma}{2(1-m)}$.

tats divers, parmi lesquels nous nous réservons à exposer ceux dont nous aurons besoin dans la suite, à mesure qu'ils seront amenés par le sujet même, attendu qu'il sera facile de les déduire de ce qui précède.

886. Nous observerons, en terminant cet article, que c'est la même chose de considérer une lentille comme restant dans une position fixe, et de faire varier celle du point radieux, ou de supposer que ce dernier point étant immobile, ce soit la lentille qui change de position, par un mouvement égal. Car il est évident que, dans l'un et l'autre cas, les dimensions du cône de lumière dont le sommet coincide avec le point radieux, et dont la base repose sur la lentille, subissent les mêmes changemens.

Analogie entre la Réfraction et la Réflexion.

887. Jusqu'ici nous avons considéré la réflexion et la réfraction comme deux effets séparés, et qui avaient lieu indépendamment l'un de l'autre. Mais l'observation prouve que les rayons qui tombent sur la surface d'un milieu réfringent d'une densité différente de celle du milieu dans lequel ils étaient mus, ne pénètrent pas tous le second milieu, ensorte qu'une partie est réfléchie au contact des deux milieux. Supposons d'abord que le second milieu soit plus rare que le premier : à mesure que les rayons, en partant de l'incidence perpendiculaire, s'inclineront davantage sur la surface du second milieu, le nombre des rayons qui échappent à la réfraction deviendra plus considérable, et il y aura un terme où ils seront tous réfléchis. Ce dernier effet est donné immédiatement par la loi même de la réfraction, ensorte que l'on peut déterminer, d'après le rapport entre les sinus d'incidence et de réfraction, l'inclinaison sous laquelle il a lieu ; car puisque dans le cas dont il s'agit, le sinus de réfraction est toujours plus grand que celui d'incidence, il est clair qu'il y a tel degré d'inclinaison où l'angle d'incidence étant encore aigu, l'angle de réfraction est droit, ensorte que la direction des

rayons rompus coincide avec la surface de contact des deux milieux ; et si l'on augmente encore l'angle d'incidence, celui de réfraction deviendra obtus, et les rayons se relèveront au-dessus de la surface de contact. Chacun de ces rayons ne se dirige point alors comme le côté de l'angle obtus qui résulte de la loi de la réfraction, mais il fait son angle de réflexion égal à l'angle d'incidence. Nous en donnerons bientôt la raison.

888. Il suit de ce qui vient d'être dit, que pour un milieu donné le rapport entre le sinus de l'angle d'incidence, sous lequel commence la réflexion totale, et le rayon, est le même que celui des sinus qui mesurent la réfraction dans le même milieu : par exemple, lorsque la lumière passe de l'eau dans l'air, les sinus étant en général comme 3 est à 4, la réflexion totale commencera sous l'angle d'incidence de $48^{d.}\ 35'$, dont le sinus est les $\frac{3}{4}$ du rayon.

889. Si le second milieu est, au contraire, plus dense que le premier, il y aura aussi une partie des rayons qui seront réfléchis au contact des deux milieux ; mais cette partie est en général moins considérable que dans le cas précédent, et quelque oblique que soit l'incidence, il y a toujours des rayons réfléchis et d'autres qui sont réfractés ; de manière cependant que le nombre des premiers va en augmentant et celui des seconds en diminuant, à mesure que l'obliquité des rayons incidens devient plus grande. On conçoit qu'alors cette obliquité ne peut jamais être telle que le sinus de réfraction devienne égal au rayon, parcequ'il est toujours plus petit que celui d'incidence.

C'est en conséquence de cette portion de rayons qui se réfléchissent en échappant à la réfraction, que la surface d'une eau tranquille et celle des autres corps transparens font, jusqu'à un certain point, l'office de miroirs.

890. Nous venons de voir que le terme où tous les rayons qui tendent à passer d'un milieu dans un autre plus rare sont réfléchis, dépend du rapport entre le sinus d'incidence et celui de réfraction ; ensorte que quand ces sinus diffèrent davantage l'un de l'autre, l'angle d'incidence qui répond à la réflexion

totale est plus petit, ou, ce qui revient au même, si l'on suppose que les rayons, en partant de l'incidence perpendiculaire s'inclinent par degrés sur la surface de contact des deux milieux, ils parviennent plus tôt à la réflexion totale. Et parceque le rapport entre les sinus dépend à son tour de la différence entre les densités des deux milieux, il en résulte que quand cette différence est plus grande, la réflexion totale se fait sous une moindre obliquité.

Mais de plus, dans toutes les incidences qui précèdent celle où la totalité des rayons est réfléchie, le nombre de ceux qui subissent la réflexion partielle dont nous avons parlé (887) est plus considérable, sous une inclinaison donnée, lorsque l'incidence requise pour la réflexion totale est plus petite, ensorte qu'il existe, à cet égard, une sorte de corrélation entre les deux réflexions. De là il suit que la portion de rayons qui se réfléchissent, au lieu de se réfracter, est plus grande sous une incidence donnée, lorsque les densités des deux milieux diffèrent davantage entre elles, et plus petite, lorsqu'elles diffèrent moins; de manière que si elles étaient égales, tous les rayons passeraient du premier milieu dans le second. Newton compare l'ensemble des deux milieux, dans ce cas, à une masse d'eau limpide, divisée en deux portions par une surface imaginaire qui transmet tous les rayons, sans en réfléchir aucun (1).

La même chose a lieu, proportion gardée, lorsque la lumière passe d'un milieu dans un autre plus dense, quoique dans ce cas il ne puisse y avoir de réflexion totale. Le nombre des rayons réfléchis à la surface de contact, sous une incidence donnée, s'accroît aussi, à mesure que la différence elle-même est plus grande entre les deux milieux. Seulement ce nombre paraît être plus petit, toutes choses égales d'ailleurs, que dans le premier cas où un milieu plus rare succède à un milieu plus dense.

---

(1) *Optice Lucis, Lib. II, Pars III, Propos. I.*

Raisons de croire que la Réfraction et la Réflexion ne sont pas produites par une cause mécanique.

Reprenons maintenant tous les faits qui viennent d'être exposés, et voyons jusqu'où la théorie est parvenue dans la recherche des causes d'où dépendent la réflexion ou la réfraction.

891. On a d'abord essayé d'expliquer ces effets, comme beaucoup d'autres, d'après les lois ordinaires de la mécanique. On a raisonné par rapport à la réflexion, comme si les molécules de la lumière ayant un ressort parfait, les surfaces qui la réfléchissent régulièrement étaient elles-mêmes parfaitement polies. Dans cette hypothèse, rien n'était si simple à concevoir que l'égalité des angles de réflexion et d'incidence, si en même temps on considérait les molécules de la lumière comme étant d'une forme globuleuse. La force de chaque globule étant oblique sur le plan de réflexion, se décomposait en deux autres forces, dont l'une, perpendiculaire au plan, était d'abord détruite par la résistance de ce plan, puis restituée toute entière en sens contraire par l'effet du ressort; l'autre, parallèle au plan, subsistait sans altération, et se combinant avec la précédente, produisait un nouveau mouvement en diagonale, incliné sur le plan précisément de la même quantité que le mouvement primitif.

892. Mais ces explications, et d'autres du même genre, qui réduisaient tout aux lois ordinaires du choc des corps, pouvaient paraître satisfaisantes, lorsque l'on considérait la réflexion sous un point de vue isolé, et que l'on attribuait aux actions des forces qui la produisent une précision mathématique. Newton, accoutumé à porter ses regards sur l'ensemble des faits, trouva dans leur rapprochement de fortes raisons à alléguer contre la théorie adoptée jusqu'alors; et examinant en-

suite la réflexion en elle-même, il jugea que le mécanisme dont on l'avait fait dépendre ne pouvait être celui de la nature.

893. Voici les principales considérations sur lesquelles il fonde son sentiment (1). Lorsque la lumière passe du verre dans l'air, le nombre des rayons qui échappent à la réfraction et se réfléchissent au contact des deux milieux, est aussi grand ou même plus grand que quand le passage se fait de l'air dans le verre. Il faudrait donc dire que l'air est plus propre à la réflexion que le verre, ce qui n'est nullement vraisemblable; mais quand cela serait, on n'y gagnerait rien, car si le verre est placé sous un récipient purgé d'air, la réflexion au passage du verre dans le vide, sera aussi forte ou même plus forte que quand l'air existait.

894. De plus, lorsqne la lumière passe du verre dans l'air sous un angle d'incidence moindre que 40 ou $41^{d.}$, une partie des rayons pénètre l'air en s'y réfractant, et lorsque l'angle d'incidence surpasse $41^{d.}$, tous les rayons sont réfléchis. Croira-t-on qu'un petit changement d'obliquité suffise pour que la lumière, qui trouvait jusqu'alors dans l'air un certain nombre de routes ouvertes, n'y rencontre plus que des parties solides qui la réfléchissent, surtout si l'on considère qu'au passage de l'air dans le verre, quelque grande que soit l'obliquité, il y a tonjours un certain nombre de rayons qui pénètrent le verre? On se figurera peut-être que dans le premier cas ce n'est point l'air, mais la dernière surface du verre qui produit la réflexion. Mais si l'on met le verre en contact avec de l'eau, une grande partie des rayons se transmettront à travers l'eau, sous la même incidence qui déterminait une réflexion totale lorsque l'air existait à la place de l'eau. Il paraît donc que la réflexion et la transmission des rayons ne dépendent point de la manière dont ils rencontrent les parties propres du verre, mais d'une certaine disposition de l'air ou de l'ean qui avoisine le verre.

895. Newton, après avoir développé plusienrs autres raisons

(1) *Optice Lucis, Lib. II, Pars III, Propos. VIII.*

qui supposent la connaissance de certains effets dont nous parlerons dans la suite, remarque que, dans l'hypothèse où la réflexion se ferait en vertu du choc des rayons contre les molécules solides des corps, les surfaces des miroirs ne pourraient renvoyer la lumière avec cette exactitude et cette régularité qui ont lieu dans la nature. On ne peut présumer que le travail de l'art, en employant le sable, et d'autres matières analogues, réussisse tellement à polir le verre, que les dernières molécules de cette substance deviennent parfaitement lisses, que leurs surfaces soient exactement planes ou sphériques, qu'elles se trouvent toutes tournées dans le même sens, et composent une surface unique qui soit partout semblable à elle-même. Ce qu'on appelle polir le verre, n'est autre chose que rendre imperceptibles pour nos yeux les aspérités qu'ils y appercevaient et les remplacer par d'autres aspérités plus petites. Il en résulte que si la lumière était réfléchie par les parties propres du verre, elle se disperserait de tous côtés sur les surfaces polies avec le plus de soin, comme sur les plus raboteuses. Comment donc arrive-t-il que la réflexion se fasse si régulièrement sur les premières? Il ne paraît pas que l'on puisse sortir autrement de cette difficulté, qu'en faisant dépendre la réflexion d'une certaine force répandue uniformément sur toute la surface du verre, et dont l'action s'exerce à une très-petite distance. Nous parlerons, dans la suite, de quelques observations qui prouvent que les corps agissent sur les rayons de la lumière.

896. Tout ce qui vient d'être dit acquerra un nouveau degré de vraisemblance, par les détails dans lesquels nous allons entrer sur la théorie de la réfraction. On a tenté de ramener aussi cette inflexion de la lumière aux lois de la mécanique, en la faisant dépendre de la résistance plus ou moins grande des milieux qu'elle pénétrait. Mais ici la théorie paraissait être en opposition avec ces mêmes lois; car on démontre qu'un corps qui passe, par exemple, de l'air dans l'eau sous une direction oblique à la surface de ce liquide, s'y réfracte en s'écartant de la perpendiculaire, et cela en conséquence

de ce que le second milieu est plus résistant que le premier. La lumière, au contraire, en passant de l'air dans l'eau, se rapproche de la perpendiculaire, d'où il paraît s'ensuivre que les milieux plus denses résistent moins au mouvement de la lumière que ceux qui sont plus rares. Comme on ne pouvait attribuer cette moindre résistance à la nature même du milieu, on a imaginé que la réfraction se faisait par l'intermède d'un fluide subtile qui occupait les pores du milieu, et qui étant d'autant plus pur et plus dégagé de tout mélange avec les fluides plus grossiers, que les pores étaient plus petits, devenait par là même moins résistant dans les milieux plus denses.

Explication physique de la Réfraction.

Newton a proposé une manière beaucoup plus heureuse d'expliquer la réfraction, à l'aide de l'attraction dans les petites distances ; voici en quoi consiste cette explication.

897. Soit *sy* (*fig.* 115) un rayon de lumière qui pénètre l'air suivant une direction oblique à la surface du milieu ABCD, que nous supposerons plus dense que l'air. Ayant prolongé CB jusqu'à ce que B*r* soit égale au rayon de la sphère d'activité sensible du milieu ABCD, puis ayant pris sur BC la partie B*z* égale à B*r*, menons *rp* et *zu* parallèles à AB. Dès que le rayon aura touché la ligne *rp*, il commencera à être plus attiré par le milieu AC que par l'air ; et cette attraction s'exerçant suivant *yn* perpendiculaire sur AB, se combinera avec la vîtesse suivant *sy*, ensorte que le rayon se détournera de sa route, en décrivant la diagonale d'un petit parallélogramme formé sous les directions des deux forces qui le sollicitent. A mesure qu'il s'approchera de AB, il sera attiré plus fortement par le milieu AC, ensorte que sa vîtesse, pour s'approcher de ce milieu, s'accélérera par des degrés dont les différences iront en augmentant, sans que la vîtesse horizontale soit changée, et qu'en même temps son mouvement continuera de s'infléchir à chaque instant ; d'où l'on voit qu'il décrira une ligne courbe *yt*, dont la concavité sera tournée vers AB ;

lorsque le rayon sera arrivé au-dessous de la ligne AB, il se trouvera attiré à la fois de haut en bas par les parties du milieu qui lui seront inférieures, et de bas en haut par les parties supérieures ; et comme l'attraction de ces dernières parties s'étend d'abord à une distance moindre que le rayon Bz de la sphère d'activité du milieu, tandis que celle des parties inférieures agit dans toute l'étendue du même rayon, il s'ensuit que le mouvement du rayon de lumière *yt* continuera de s'accélérer, mais par des degrés dont les différences iront en décroissant, et ainsi la nouvelle portion de courbe *tf* qu'il décrira, sera tournée dans le même sens que la première ; mais aussitôt que le rayon touchera la ligne *uz*, il se trouvera entièrement prolongé dans la sphère d'activité du milieu, et alors étant attiré également de tous côtés, il prendra un mouvement rectiligne dirigé selon la tangente *fk* à l'extrémité de la courbe *ytf*.

Il est clair que le rayon, en décrivant cette courbe, se rapproche de la perpendiculaire *ctm*, au point d'immersion ; et comme la courbe est extrêmement petite, la route du rayon paraît n'être composée que de deux lignes droites, situées comme *sy* et *fk*, et qui se coupent au point d'immersion.

Les mêmes effets se répètent dans un ordre inverse, depuis le point *k*, dont la distance à la ligne DC est égale au rayon Bz de la sphère d'activité sensible du milieu, ensorte que le rayon de lumière décrit ici une seconde courbe *kic* semblable à la première, mais dont la concavité est tournée en sens opposé ; d'où il suit que quand le rayon n'est plus attiré que par l'air environnant, il se meut en ligne droite suivant *el*, en s'écartant de la perpendiculaire *gio*, au point d'émergence, ensorte que l'angle formé par *el* avec *oi* est égal à celui que forment entre elles les lignes *sy*, *ct*, c'est-à-dire, que *el* est parallèle à *sy*.

898. L'attraction de l'air se combine avec celle du milieu AC jusqu'à une certaine limite située à une distance de AB ou de CD moindre que Br ; et comme elle agit toujours plus faiblement que celle du milieu AC, à laquelle sa direction est

contraire, son effet se borne à modifier un peu la figure de la courbe *ytf* ou *kie*, dont la concavité restera tournée dans le même sens. D'ailleurs, il est facile de voir que les petites altérations que subit la force du milieu AC, de la part de celle de l'air, étant les mêmes de part et d'autre à des distances respectivement égales de AB et de CD, les deux courbes *ytf*, *kie* ne laisseront pas de se ressembler ; ensorte que, tout compensé, le mouvement du rayon peut être considéré comme produit par une seule force accélératrice variable entre certaines limites voisines des lignes AB, CD, et qui éprouve, de part et d'autre, les mêmes changemens en sens opposé (1).

La théorie précédente suppose que la lumière se propage par émission ; et ainsi, dans cette hypothèse, la réfraction s'explique plus heureusement que dans celle de pression.

899. Comme la lumière est transmise par un milieu quelconque dans toutes les directions possibles, il faut concevoir qu'il en est des molécules des corps diaphanes, comme de celles de la lumière elle-même, c'est-à-dire, que les distances entre ces molécules sont incomparablement plus grandes que

(1) Nous avons dit (869) que, relativement à un même milieu, le sinus d'incidence est en rapport constant avec celui de réfraction : c'est ce que nous allons démontrer à l'aide d'un principe qui tient à la théorie des forces accélératrices. Soit toujours AB (*fig.* 116) la surface du milieu réfringent que nous supposons plus dense que l'air, *st* le rayon incident, *ti* le rayon réfracté, *bm* la perpendiculaire au point d'immersion, et *sb*, *im* deux perpendiculaires sur cette même ligne. Si *st* représente en même temps la vîtesse du rayon dans l'air, on pourra décomposer cette vîtesse suivant deux directions *sb* et *bt*, dont la première représentera la vîtesse horizontale du rayon incident, et l'autre sa vîtesse verticale. Supposons que l'on ait pris *ti*, de manière que *im* soit égale à *bs* ; la vîtesse horizontale étant toujours la même pendant que le rayon se meut suivant *ti*, puisque l'action de la force accélératrice ne peut apporter aucun changement à cette vîtesse, elle sera encore représentée par *im* égale à *bs* ; d'où il suit que la vîtesse verticale relative au mouvement suivant *ti* sera représentée par *tm*. Or, le principe dont nous avons parlé consiste en ce que la quantité dont le carré de la vîtesse verticale se trouve augmenté par l'effet de la force attractive du milieu est une constante, quelle que soit la direction du rayon incident ; c'est-à-dire, que

leurs épaisseurs. Les physiciens qui admettent la propagation de la lumière par pression, sont conduits à la même conséquence. Bouguer a cru pouvoir éluder la difficulté en supposant que les parties solides des corps diaphanes, qui se trouvaient sur la direction des rayons de lumière, transmettaient l'action de ces rayons en suppléant à la matière subtile, dans les petits espaces où celle-ci se trouvait interrompue ; mais il n'est nullement probable que ces parties aient la figure, la disposition et le degré d'élasticité nécessaires pour propager aussi exactement les vibrations de la lumière, que si les rayons de ce fluide formaient des lignes continues.

Cas où la Réfraction se change en Réflexion totale.

900. Nous avons vu (887) que les rayons qui se présentent sous un certain degré d'obliquité, pour pénétrer un milieu plus rare que celui qu'ils traversent, sont réfléchis tous à la fois au contact des deux milieux. Or, l'explication que nous avons donnée de la réfraction peut servir à faire concevoir la raison de cet effet ; car le rayon de lumière, parvenu à une

---

si l'on désigne par u^2 le carré de la vîtesse bt, et par V^2 celui de la vîtesse tm, la différence $V^2 - u^2$ sera une constante. Soit d^2 cette différence, et soit h la vîtesse horizontale bs. Prenons sur ti la partie tz égale à st, puis par le point z, menons zy parallèle à im ; bs, ou son égale im, représentera le sinus d'incidence, et zy celui de réfraction. Or, $zy : im :: tz : ti$. Mais tz ou $ts = \sqrt{(bt)^2 + (bs)^2} = \sqrt{u^2 + h^2}$; $ti = \sqrt{(tm)^2 + (im)^2} = \sqrt{u^2 + d^2 + h^2}$. Donc le rapport entre tz et ti, ou entre les sinus zy et im, est $\sqrt{\frac{u^2 + h^2}{u^2 + d^2 + h^2}}$. Mais parceque le rayon incident a la même vîtesse, quelle que soit son inclinaison, le numérateur $\sqrt{u^2 + h^2}$, ou l'expression de tz, est une quantité constante. Donc le dénominateur $\sqrt{u^2 + d^2 + h^2}$ étant composé du carré constant $u^2 + h^2$ et de la constante d^2, sera lui-même constant. Donc, tel sera aussi le rapport entre les sinus.

Newton a donné une belle démonstration du même résultat, par la Synthèse. *Philos. Natur. Princip. Mathem.*, t. I, sect. XIV, propos. 94, théor. 48.

distance du contact des deux milieux, moindre que le rayon de la sphère d'activité du milieu qu'il pénètre, et se trouvant plus attiré par les molécules situées au-dessus de lui que par celles qui sont en dessous, commencera à infléchir son mouvement et à décrire une courbe qui tournera sa convexité vers la surface de contact. Si telle est l'inflexion de la courbe, que celle-ci coupe la surface de contact, il n'y aura qu'une partie des rayons qui soit réfléchie au contact, et le reste sera transmis. Mais si l'obliquité du rayon incident est assez grande pour qu'il y ait un arc de la courbe, dont la tangente soit parallèle à la surface de contact, le rayon, après avoir décrit cet arc, se relèvera en décrivant une seconde branche de courbe semblable à la première, après quoi il prendra un mouvement uniforme, suivant la tangente au dernier arc de la courbe, et il est évident que cette tangente se trouvera inclinée sur la surface de contact de la même quantité que le rayon incident ; d'où il suit que l'angle de réflexion sera égal à l'angle d'incidence (1).

Vues de Newton sur la Réfraction et la Réflexion considérées comme ayant une même cause.

901. La réflexion dont nous venons de parler est produite immédiatement en vertu de la cause d'où dépend la réfraction, en quoi elle paraît distinguée des réflexions qui ont lieu sous les incidences précédentes, et que l'on serait porté à considérer, au contraire, comme des espèces d'exceptions à la loi de la réfraction : cependant il est très-probable, et c'est l'opinion de Newton, que la réflexion et la réfraction proviennent, en général, d'une meme puissance qui agit diverse-

(1) Newtonis *Philos. Natur. Princip. Mathem.*, sect. XIV, propos. 96, theor. 50.

ment, suivant la diversité des circonstances (1); car, dans toutes les incidences qui précèdent celle où la réfraction se change en réflexion totale, le nombre des rayons réfléchis est aussi plus grand en général, lorsque l'obliquité requise pour la réfraction totale est plus petite. Or, elle l'est d'autant plus que les deux milieux diffèrent davantage en densité, ou, ce qui revient au même, que la force de la réfraction, qui dépend de la grandeur de l'angle de réfraction, est plus considérable; et comme d'une autre part, la force de la réflexion dépend du nombre des rayons réfléchis, il sera vrai de dire qu'en général les milieux qui réfractent le plus fortement la lumière, sont aussi ceux qui la réfléchissent le plus fortement.

902. Newton, pour désigner la puissance dont il s'agit, emploie tantôt le nom d'attraction, tantôt celui de répulsion: par exemple, lorsque la lumière rencontre, sous un certain degré d'obliquité, la dernière surface d'une masse de verre placée dans le vide, et qu'elle se réfléchit en entier, il est visible que cet effet ne peut être attribué qu'à l'attraction du verre, puisque le vide est incapable d'exercer aucune action; mais si l'on enduit la surface du verre de quelque liquide, comme l'eau ou l'huile, un certain nombre de rayons qui étaient réfléchis dans le cas précédent, pénétreront le liquide, parceque l'attraction du verre est balancée en partie par l'attraction contraire de l'eau ou de l'huile (2).

D'une autre part, lorsque la lumière se réfléchit à la rencontre d'un corps, les molécules propres de ce corps paraissent exercer sur elle une action répulsive, et parceque ce corps, lorsqu'il est diaphane, agit en même temps par attraction sur la portion de lumière qui se réfracte, on peut concevoir que cette attraction s'étend jusqu'à un plan situé à une très-petite distance de la surface du corps, parallélement à cette surface, et qu'au-delà de ce plan la répulsion a lieu jusqu'à

(1) *Optice Lucis*, lib. II, pars 3, propos. 9.

(2) *Optice Lucis*, lib. III, quæst. 29.

une

une autre distance presqu'infiniment petite ; et comme en algèbre les quantités négatives s'évanouissent lorsque les quantités positives commencent à avoir lieu, de même dans les effets physiques dont il s'agit ici, la force répulsive succédera immédiatement à la force attractive (1).

Parmi les rayons qui se meuvent vers la surface du milieu réfringent, il arrivera le plus souvent que les uns seront repoussés, et les autres attirés, pour être ensuite transmis par le milieu, et cette différence paraît tenir à certaines circonstances que Newton a de même déterminées, et dont nous parlerons à l'article des couleurs.

903. Newton ne s'en est pas toujours tenu aux actions à distance, pour y ramener les effets dus à la réflexion et à la réfraction. Il a présumé que ces effets pourraient bien dépendre de l'action d'une matière très-subtile, répandue partout et jusque dans l'intérieur des corps diaphanes ; et en concevant que cette matière avait plus de densité dans les corps plus rares, et que sa densité augmentait peu à peu, en allant d'un milieu plus dense vers un milieu plus rare, il pensait qu'on pourrait expliquer, d'après cette hypothèse, comment la lumière se réfractait dans certaines circonstances, en infléchissant son mouvement par degrés, et comment elle se réfléchissait dans d'autres circonstances, en cherchant à s'écarter des espaces où la matière subtile était plus dense, pour se porter vers ceux où elle était plus rare (2).

904. Au reste, il n'est pas surprenant de voir ici Newton se donner cette espèce de liberté de conjecturer. Il ne propose ses opinions que comme de simples doutes, dans ses Questions d'Optique, où il semble faire l'histoire des pensées qui se sont présentées successivement à son esprit dans ses profondes méditations sur la nature, comme pour inviter les philosophes qui le liront à les discuter et à les éclaircir.

---

(1) *Optice Lucis*, lib. III, quæst. 31.

(2) *Ibid.*, lib. III, quæst. 18.

Il résulte du moins de leur ensemble, que la réflexion et la réfraction de la lumière sont produites très-vraisemblablement par des forces particulières, du genre de celles qui s'exercent de molécule à molécule, et qu'en se bornant aux effets, tels qu'ils se présentent à nous, on peut employer les mots d'*attraction* et de *répulsion* pour désigner ces mêmes forces, comme en chimie on se sert du mot *affinité* pour exprimer la tendance qui sollicite les unes vers les autres les molécules constituantes des corps. C'est une nouvelle classe de phénomènes infiniment variés qui rentre dans le domaine des forces dont il s'agit, et ce domaine est déjà si étendu, d'après tout ce que nous avons dit dans les articles précédens, que tout ce qui tend à en reculer les limites contribue par cela seul à la perfection de la Physique, en simplifiant le tableau de la nature. L'espèce de refus que les physiciens ont fait pendant long-temps, et que quelques-uns font encore, d'admettre de pareilles forces, ne vient que de la pente qu'ils ont à chercher, dans les effets naturels, des actions analogues à celles qu'exercent continuellement sous nos yeux les corps qui se choquent, et les différens mobiles qu'emploie notre mécanique. Comme ces actions ont lieu au contact et qu'elles nous sont familières, elles paraissent offrir à l'esprit des conceptions plus nettes, quoiqu'au fond l'impulsion, considérée attentivement, ait ses mystères comme l'attraction. On a accusé en conséquence les partisans des forces qui agissent à distance, de reproduire les qualités occultes des anciens philosophes. Cependant la différence est immense entre ces sympathies et ces antipathies, qu'il suffisait de nommer pour que tout fût dit, et ces principes qui expriment des faits généraux dont le développement conduit au rapprochement de tous les autres faits qui en dépendent. Là tout restait inconnu pour le physicien : ici, en partant d'un fait général qu'il prend pour cause, il en déduit, par rapport à tout le reste, des connaissances claires et précises. Les qualités occultes plongeaient tous les phénomènes de la nature dans une obscurité profonde et impénétrable ; les forces admises par Newton les placent au milieu d'un espace bien éclairé, excepté

dans un point, où se trouve un nuage qu'il n'a point été donné à l'œil du génie de pouvoir percer.

Détermination approximative de la hauteur de l'Atmosphère, à l'aide de la Réflexion occasionnée par le Crépuscule.

905. Si l'atmosphère n'existait pas, nous ne pourrions être éclairés que par les rayons qui nous viendraient en ligne directe du soleil. Le jour et la nuit se succéderaient comme par un saut brusque ; cette alternative subite semblerait même se répéter à chaque instant, lorsque nous passerions d'un lieu exposé aux rayons solaires dans un autre où ils ne pourraient pénétrer immédiatement, et le tableau de la nature serait défiguré par un assemblage désagréable de clarté et de ténèbres. Mais la même Providence qui nous a préparé, dans cette grande masse de fluide répandue autour du globe, l'aliment de la vie et le véhicule de la parole, l'a destinée encore à nous faire jouir plus complétement du bienfait de la lumière. Lorsque le soleil n'est pas encore arrivé sur l'horizon, ou lorsque déjà il s'est abaissé en dessous de ce cercle, ses rayons, après s'être réfractés en pénétrant l'atmosphère, vont se réfléchir sur ses différentes couches, d'où ils se dirigent vers tous les objets qui nous environnent, et les rendent visibles pour nous. Ils nous donnent ainsi le crépuscule du matin ou l'aurore, en amenant le jour par une gradation imperceptible, et produisent le crépuscule du soir, en retardant, par une nouvelle gradation en sens contraire, l'instant où le jour achève de s'éteindre. Et tandis que le soleil parcourt la partie de son cercle diurne élevée au-dessus de l'horizon, c'est encore l'atmosphère qui, par des réflexions multipliées, distribue les rayons lumineux dans une multitude d'endroits où leur direction primitive ne les aurait pas conduits.

906. D'après ce que nous venons de dire, on peut se faire une idée du moyen que l'on a imaginé pour déterminer la hau-

teur de l'atmosphère, et que nous avons promis d'indiquer (400). Lorsque le soleil s'avance vers l'horizon d'un lieu, aux approches du jour, parmi ceux de ces rayons qui se répandent dans l'atmosphère, il y en a un qui est tangent à la surface de la terre, et l'aurore naît pour un spectateur auquel appartient l'horizon dont il s'agit, au moment où ce même rayon est tellement situé, qu'après avoir été se réfléchir sur la concavité de l'atmosphère, il se dirige vers le spectateur. On a observé que le point du jour avait lieu, lorsque le soleil était encore abaissé de $18^{d.}$ au-dessous de l'horizon.

Or, il est facile de concevoir qu'il y a une certaine hauteur que doit avoir l'atmosphère, pour que la réflexion qui produit le crépuscule commence, lorsque le soleil est à $18^{d.}$ au-dessous de l'horizon. Car si l'atmosphère était, par exemple, plus élevée que dans l'hypothèse actuelle, le rayon dont nous venons de parler ayant une plus grande étendue à parcourir, avant de rencontrer la dernière couche d'air, se réfléchirait suivant une direction différente de celle sur laquelle se trouve notre spectateur, d'où il résulte que le point du jour répondrait pour lui à un autre abaissement au-dessous de l'horizon. Or, en calculant la hauteur de l'atmosphère qui répond à un abaissement de $18^{d.}$, on a trouvé qu'elle était à-peu-près de 60000 mètres ou 30784 toises. Mais ce résultat prouve seulement qu'à la distance de 60000 mètres, la densité des molécules de l'air est encore assez grande, pour nous renvoyer une lumière sensible, ensorte que nous sommes certains que l'atmosphère s'étend au moins jusques-là, sans pouvoir assigner d'une manière précise sa dernière limite (1).

---

(1) *Voyez*, pour la démonstration du résultat que nous venons d'indiquer, le Traité Elémentaire d'Astronomie Physique, p. 276. Nous renvoyons de même à cet excellent ouvrage, p. 36 et suiv., pour tout ce qui concerne la réfraction astronomique et la réfraction terrestre.

De la Puissance Réfractive.

907. La force que les corps diaphanes exercent sur les rayons de la lumière, pour les détourner de leur direction primitive, et leur faire subir la loi de la réfraction, est une force accélératrice, qui agit perpendiculairement à la surface de ces corps (897), et à laquelle Newton a donné le nom de *puissance réfractive*. Il a de plus entrepris d'en mesurer l'effet par rapport à chaque corps, et en la comparant dans les différens corps, il est parvenu à des résultats qui offrent une nouvelle preuve de cette prérogative qui semblait lui avoir été accordée, de ne pouvoir rien toucher, sans y laisser l'empreinte de son génie.

Voici de quelle manière il détermine la puissance réfractive. Il suppose qu'un rayon de lumière *cr* (*fig.* 119) rencontre la surface *ab* de chaque corps sous un angle infiniment petit *cra*, ou, ce qui revient au même, il suppose que l'angle d'incidence *crm* soit sensiblement droit. Il décompose ensuite le mouvement *rg* du rayon rompu suivant deux directions, dont l'une *rn* est située sur la surface réfringente, et l'autre *gn* lui est perpendiculaire. Comme le rayon incident *cr* avait une vîtesse censée nulle dans le sens de cette perpendiculaire, tout l'effet qui a lieu dans ce même sens provient de la force accélératrice, ou de la puissance réfractive du milieu ; et l'on prouve, d'après la théorie des forces accélératrices, que si l'on suppose la ligne *rn* constante, la puissance réfractive sera comme le carré de la perpendiculaire *gn* (1).

---

(1) Nous avons dit (note du N° 898) que l'accroissement du carré de la vîtesse verticale, lorsque la lumière passe d'un milieu dans un autre plus dense, est une quantité constante pour toutes les incidences du rayon. Or, si l'on suppose, comme dans le cas dont nous venons de parler, que l'incidence se fasse sous un angle infiniment petit, l'accroissement du carré de la vîtesse ne sera plus distingué du carré de cette vîtesse elle-même, c'est-à-dire, qu'il sera représenté par $(gn)^2$. Ainsi le résultat dont il s'agit ici est lié avec celui qui nous a servi à démontrer la loi de la réfraction.

Apperçus de Newton, sur la nature du Diamant et sur celle de l'Eau.

908. Newton ayant comparé les puïssances réfractives de différentes substances avec leurs densités, estimées d'après leurs pesanteurs spécifiques, trouva que les corps, considérés sous ce point de vue, formaient comme deux classes distinctes, l'une de ceux qu'il regarde comme fixes, tels que les pierres, l'autre de ceux qu'il appelle gras, sulfureux et onctueux, tels que les huiles, le succin, etc. Dans chaque classe, la puissance réfractive était à-peu-près proportionnelle à la densité; mais les corps de la seconde classe, à densité égale, avaient une puissance réfractive beaucoup plus considérable que ceux de la première.

909. Or, la grande puissance réfractive du diamant plaçait cette substance parmi les corps onctueux et sulfureux; et dans la table où Newton avait présenté la série des rapports entre les puissances réfractives et les densités, le diamant se trouve à la suite de l'huile de térébenthine et du succin.

Newton avait conclu de ce résultat, que le diamant était probablement une *substance onctueuse coagulée*, expression qui, dans le sens que Newton lui-même y attachait, est un synonyme d'*inflammable*.

910. Ce grand géomètre va plus loin; il remarque que l'eau a une puissance réfractive moyenne entre celle des corps des deux classes, et que vraisemblablement elle participe de la nature des uns et des autres; car elle fournit à l'accroissement des plantes et des animaux, qui sont composés en même temps et de parties sulfureuses, grasses et inflammables, et de parties terrestres, sèches et alkalisées.

Ainsi, Newton avait presque lu dans les résultats de la réfraction que le diamant est un corps combustible, et que l'eau renferme un principe inflammable. En énonçant ces apperçus, il s'exprime dans le langage de la chimie de son temps, et c'est une raison de plus pour admirer comment son génie, placé

dans un si grand éloignement, a été aborder de si près, et par une route en apparence si détournée, des vérités importantes que l'état des connaissances humaines, à cette époque, semblait devoir rendre inaccessibles.

Analogie entre la Puissance réfractive des Corps et leur Composition chimique.

Le célèbre Biot ayant sondé la profondeur des inductions que Newton avait déduites de ses belles expériences sur la puissance réfractive, par rapport au diamant et à l'eau, y a découvert le germe d'un grand travail, à l'aide duquel on pourrait pénétrer beaucoup plus avant dans l'essence des corps naturels, et se servir des lois de la lumière, pour soumettre au calcul la composition chimique de ces mêmes corps. Il avait besoin de s'associer, pour l'exécution de ce travail, un coopérateur d'un mérite distingué, et il l'a trouvé dans la personne de M. Arrago, secrétaire du bureau des longitudes.

911. Dans l'exposé qu'il a fait lui-même des résultats auxquels il est parvenu, il remarque avec beaucoup de justesse, que l'action des corps sur la lumière ne s'exerçant qu'à de très-petites distances, l'intensité de cette action est nécessairement liée à la nature des particules de chaque corps, et à ses propriétés les plus intimes. « Le physicien, dit-il, qui observe les pouvoirs réfractifs des substances, pour les comparer entre eux, agit absolument comme le chimiste, qui présente successivement une même base à tous les acides, ou un même acide à tous les alkalis, pour déterminer leurs forces respectives, et leur degré de saturation. Dans nos expériences, la substance que nous présentons à tous les corps est la lumière, et nous évaluons l'action qu'ils exercent sur elle par leur pouvoir réfractif, c'est-à-dire par l'accroissement de force vive que l'action de leurs particules tend à lui imprimer ».

912. Les premières opérations des deux auteurs ont eu pour objet la réfraction des fluides aériformes. Ils se sont servi d'un

prisme composé de lames de verre exactement réunies par leurs bords, dans lequel ils introduisaient le gaz qu'ils voulaient soumettre à l'expérience. Telle est la perfection des moyens qu'ils ont employés, soit pour la mesure de l'angle réfringent de ce prisme, soit pour la mesure des angles d'incidence et de réfraction de la lumière, produits par l'action du gaz que renfermait le même prisme, qu'ils ont toujours obtenu ces angles avec la précision des secondes. L'instrument à l'aide duquel ils les ont mesurés, et qui a été inventé par Mayer et perfectionné par Borda, est un cercle entier, que l'on a nommé *cercle répétiteur*, parcequ'en recommençant de diverses manières, avec cet instrument, une opération relative à la mesure d'un même angle, on soudivise chaque fois l'erreur dont la valeur de cet angle pourrait être affectée, si l'on se bornait à un seul résultat, ensorte qu'il ne tient, pour ainsi dire, qu'à la patience de l'observateur, que l'erreur, en s'atténuant de plus en plus, ne finisse par disparaître.

913. L'action qu'un corps exerce sur un rayon de lumière pour le déterminer à infléchir son mouvement, est la somme des actions exercées par toutes les molécules qui appartiennent à la sphère d'activité sensible dans laquelle se trouve actuellement le rayon; elle s'estime, comme nous l'avons vu (907), par l'accroissement du carré de la vîtesse verticale qu'avait le rayon, lorsqu'il traversait l'air en vertu de son mouvement primitif, ou, ce qui revient au même, elle s'estime par le carré de la perpendiculaire *gn* (*fig.* 119), qui a lieu dans l'hypothèse où l'angle d'incidence est infiniment petit. Ainsi, en divisant l'accroissement du carré de la vîtesse par le rapport entre le nombre des molécules agissantes et le volume qu'elles occupent, ou, ce qui est la même chose, par la densité du corps, on aura la puissance réfractive de chaque molécule. Le résultat de cette opération faite sur différens corps, par MM. Biot et Arrago, leur a servi de donnée, comme nous le verrons bientôt, pour établir une corrélation entre l'affinité des molécules de ces corps sur la lumière, et l'affinité mutuelle des mêmes molécules.

914. Les deux auteurs, en comparant d'abord les actions des différens gaz sur la lumière, mesurées par les puissances réfractives des molécules, ont trouvé l'action de l'hydrogène six fois aussi grande que celle de l'air. Parmi tous les fluides, et même parmi tous les corps de la nature, le gaz dont nous venons de parler tient, à cet égard, le premier rang; et l'oxygène est au contraire un des corps dont l'action soit la plus faible. La grande force réfractive de l'hydrogène avait déjà été pressentie et annoncée par le célèbre Laplace. Les deux auteurs expliquent, d'après elle, pourquoi l'eau, les gommes, les huiles et les diverses substances inflammables observées par Newton, possèdent le pouvoir de réfracter la lumière, dans un rapport qui surpasse sensiblement celui qu'indiquent leurs densités. C'est l'effet de l'hydrogène qui, présent dans toutes ces substances, leur communique son caractère. L'influence de ce principe se retrouve éminemment dans l'ammoniaque, où il est combiné avec l'azote, et dont le pouvoir réfractif est double de celui de l'air et surpasse celui de l'eau.

915. Les mêmes savans ont aussi examiné avec beaucoup de soin les forces réfractives de l'air et des gaz, à différentes densités, en ne laissant entrer dans le prisme qu'une certaine quantité d'air ou de tout autre principe, qu'ils faisaient varier à volonté. Ils ont trouvé que la réfraction d'un même gaz est toujours proportionnelle à la densité de ce gaz. Mais ils se sont arrêtés au degré de densité qui avait lieu sous la pression moyenne de l'atmosphère. Ils ont le projet de continuer leur travail sur l'air condensé plus fortement et élevé à de hautes températures.

916. La conséquence qui naissait des observations relatives à l'influence de l'hydrogène sur la réfraction des substances auxquelles il est uni, n'a pas échappé à M. Biot; car s'il en est des autres corps comme de ce principe, qui porte dans les composés où il entre, le caractère dont la réfraction l'a marqué, ne devait-on pas, en combinant les puissances réfractives des principes constituans d'une substance, parvenir à un résultat qui représenterait la puissance réfractive de cette

substance elle-même, et faire ainsi, à l'aide de la lumière, une opération de synthèse qui se trouvât d'accord avec celle que ferait le chimiste, en réunissant les principes dont il s'agit, pour en former un composé?

917. Ce raisonnement s'applique d'abord, sans aucune restriction, au cas où les principes constituans sont unis, comme dans l'air atmosphérique, par voie de simple mélange. Alors, si l'on exprime par l'unité le poids du mélange, et que l'on multiplie la puissance réfractive de la molécule de chaque principe, par la fraction qui représente la quantité pondérale que ce même principe fournit au mélange, la somme des produits sera égale à la puissance réfractive de la molécule du mélange. Car cette puissance réfractive se compose des actions qu'exercent sur la lumière les molécules des principes constituans, proportionnellement à la quantité qui entre de chacun d'eux dans une molécule du mélange.

Lors même que les principes constituans sont dans un état de combinaison intime qui leur a fait subir une condensation, le même accord se soutient entre les puissances réfractives, avec de légères différences, qui n'ont lieu toutefois que dans le cas où la condensation a été très-forte. C'est ce que l'on concevra, si l'on fait attention que les puissances réfractives d'un gaz que l'on fait passer par différens degrés de densité sont proportionnelles à ces mêmes degrés, quoiqu'alors la quantité de calorique renfermée dans le gaz change continuellement (216). Il en résulte que le *maximum* de condensation qui détermine le passage de l'état gazeux à l'état liquide, ne doit pas produire une altération bien sensible dans la force réfractive de la molécule, puisque cette force n'est autre chose que le quotient de deux quantités qui varient en général dans le même rapport.

918. L'expérience vient à l'appui de cette observation. Le gaz ammoniaque en fournit un exemple d'autant plus remarquable que la condensation réduit l'azote et l'hydrogène qui le composent à la moitié du volume qu'ils occupaient lorsqu'ils étaient libres, sans que leur action sur la lumière en soit altérée. Ainsi, la puissance réfractive d'une molécule d'hydrogène

est 6,4534, celle d'une molécule d'air étant l'unité ; d'une autre part, la puissance réfractive d'une molécule d'azote rapportée à la même unité est 1,0297 ; enfin celle d'une molécule de gaz ammoniaque est 2,0874. D'après ces données, veut-on déterminer, à l'aide du calcul, la quantité pondérale d'hydrogène renfermée dans un poids de gaz ammoniaque représenté par l'unité ? La formule de M. Biot indique qu'il faut diviser la différence entre la puissance réfractive d'une molécule de gaz ammoniaque et celle d'une molécule d'azote, par la différence entre la puissance réfractive d'une molécule d'hydrogène et celle d'une molécule d'azote, c'est-à-dire, qu'il faut diviser 2,0874 — 1,0297 par 6,4534 — 1,0297, ce qui donne 0,1950 pour la quantité pondérale d'hydrogène renfermée dans un poids d'ammoniaque qui a pour expression l'unité (1). Or les expériences faites par Berthollet et Davy donnent pour la même quantité $\frac{1}{5}$ ou 0,200, dont la légère différence 0,005 avec le résultat précédent est tout à fait dans les limites des erreurs inséparables de l'observation, et peut-être même doit-elle être attribuée à ce que le gaz hydrogène employé par MM. Biot et Arrago étant, à raison de sa grande pureté, 13 fois $\frac{1}{2}$ plus léger que l'air atmosphérique, cette circonstance devait augmenter sa puissance réfractive, relativement à la densité. Ainsi, dans l'hypothèse où l'on aurait seulement connu les qualités des principes de l'ammoniaque, il eût été facile d'en déterminer très-exactement les quantités respectives d'après les lois de la réfraction. On ne se serait pas attendu qu'une simple mesure d'angle pût devenir l'équivalent d'une analyse chimique.

919. La formation de l'eau, par la réunion du gaz hydro-

(1) Voici la formule à l'aide de laquelle M. Biot représente généralement toutes les opérations semblables à celle-ci. Soit P le pouvoir réfractif d'une molécule du mixte, A celle d'une molécule d'un des principes, B celle de la molécule de l'autre principe, x la quantité pondérale cherchée, et que nous supposerons être celle du principe A, on aura $xA+B(1-x)=P$, d'où l'on tire $x=\frac{P-B}{A-B}$.

gène et du gaz oxygène, détermine une condensation incomparablement plus forte que celle qui a lieu dans le cas précédent. Cependant, la puissance réfractive des molécules de l'eau ne surpasse que d'environ $\frac{1}{8}$ celle à laquelle on est conduit par le calcul fondé sur la règle que nous avons exposée ; et cette différence paraîtra bien légère, si l'on fait attention que les deux gaz, en passant à l'état de liquidité, se resserrent dans un volume deux mille fois plus petit que celui qu'ils occupaient primitivement.

920. Il était important pour les deux auteurs de chercher la puissance réfractive des molécules du carbone, attendu le grand nombre de substances dans lesquelles ce combustible entre comme principe constituant ; et d'ailleurs le diamant, que l'on avait regardé jusqu'alors comme uniquement formé du même principe, méritait seul que les lois de la lumière déjà si heureusement employées par Newton pour deviner sa propriété combustible, servissent encore à vérifier le résultat de son analyse. Or, la réfraction du carbone ne pouvant être déterminée immédiatement, les auteurs l'ont déduite de celle de l'acide carbonique, d'après la connaissance qu'ils avaient de celle de l'oxygène combiné avec le carbone dans cet acide, et ils l'ont trouvée égale à 1,44, c'est-à-dire un peu moindre que celle de l'eau. Cette détermination a été d'abord appliquée successivement à l'huile d'olive, à l'alkohol, puis à la gomme arabique, toutes substances qui renferment du carbone dans leur composition, et la différence entre le résultat du calcul et celui de l'observation, n'a pas excédé de $\frac{1}{7}$ la valeur relative à la somme des principes constituans.

921. A l'égard du diamant, les deux auteurs ont trouvé que la puissance réfractive de sa molécule, déterminée par Newton, était presque double de celle que leur avait donnée le carbone, d'où ils ont conclu que le diamant n'est pas uniquement composé de ce principe. M. Biot remarque qu'on ne peut alléguer ici l'effet de la condensation, pour faire croître la force réfractive. Car si le passage de l'état de gaz à celui de liquidité, lorsque l'hydrogène, par exemple, se combine

avec l'oxygène pour former de l'eau, ne détermine qu'un accroissement de $\frac{1}{8}$ dans la force réfractive, peut-on admettre un accroissement huit fois aussi grand, dans le passage du carbone à l'état de solidité, qui, sous le rapport de la densité, est bien plus voisin de l'état de liquidité, que ce dernier ne l'est de l'état élastique? M. Biot conclut de là que la grande force réfractive du diamant décèle dans ce minéral la présence de l'hydrogène, qui, comme nous l'avons vu (914), semble être en possession d'élever les puissances réfractives des corps combustibles bien au-dessus du degré indiqué par le rapport de leur densité; et en partant des observations de Newton, il juge que le diamant devrait contenir 0,35, ou plus du tiers de son poids d'hydrogène, pour que sa composition fût d'accord avec sa puissance réfractive. Le même savant ajoute qu'en réduisant ce nombre proportionnellement aux petites différences observées entre les résultats du calcul et ceux de l'expérience, on l'abaisserait jusqu'à 0,25 ou $\frac{1}{4}$; mais qu'on ne pourrait le diminuer davantage, sans se trouver en contradiction avec ce que tous les autres résultats paraissent annoncer.

Les deux auteurs se proposent de poursuivre un travail aussi intéressant pour la Chimie et pour la Physique, et qui tend également à perfectionner la théorie des réfractions astronomiques. C'est une source commune de nouvelles connaissances qu'ils ont ouverte aux différentes sciences entre lesquelles se partage l'étude de la nature.

De l'Inflexion de la Lumière.

Les détails dans lesquels nous sommes entrés précédemment ne laissent aucun lieu de douter que les corps n'agissent réellement sur la lumière à de petites distances. Le phénomène que nous allons décrire offre une nouvelle preuve de cette action, à laquelle il serait d'autant plus difficile de se refuser, qu'elle parle pour ainsi dire aux yeux.

922. Grimaldi avait observé que, si l'on faisait passer un rayon de lumière par un très-petit trou dans une chambre

obscure, les ombres des corps exposés à cette lumière étaient plus larges qu'elles n'auraient dû l'être, si les rayons avaient été raser les extrémités de ces corps. Newton répéta cette expérience avec un cheveu dont l'ombre se projetait sur un plan, qu'il plaça successivement à différentes distances du cheveu, et il observa qu'à une distance de quatre lignes, la largeur de l'ombre était quadruple de celle du cheveu, qu'elle devenait dix fois plus grande à une distance de deux pieds, et trente-cinq fois plus grande à une distance de dix pieds.

Mais comme plusieurs physiciens avaient attribué cette augmentation de l'ombre à la réfraction de l'air voisin du cheveu ; Newton, pour reconnaître si cette explication était la véritable, enduisit d'eau une plaque de verre, sur laquelle il étendit le cheveu, et qu'il recouvrit ensuite d'une autre plaque semblable, de manière que le cheveu était plongé dans l'eau qui remplissait l'intervalle entre les deux verres, et il trouva que l'ombre du cheveu, à distance égale, avait encore la même largeur (1).

Cette expérience faisait voir que la lumière parvenue à une petite distance du cheveu, évitait de le raser, en se repliant de part et d'autre ; et cet effet ne pouvait être attribué qu'à une espèce de répulsion que le cheveu exerçait sur la lumière (2).

Newton fit d'autres expériences sur le même sujet, d'où il conclut que les corps agissaient aussi par attraction sur les rayons qui passaient près d'eux. Ces effets contraires se concilient d'après les expériences de Sgravesande (3), dont nous allons donner une idée.

923. Concevons que *bac* (*fig.* 117) soit une section faite par un plan horizontal dans une lame tranchante située ver-

---

(1) Si la réfraction avait été la cause de l'effet dont il s'agit, l'eau ayant un pouvoir réfractif beaucoup plus considérable que l'air, cette différence aurait dû en apporter une sensible dans la largeur de l'ombre du cheveu.

(2) *Optice Lucis*, lib. III, observ. 1, 2, 3, etc.

(3) *Physices Elementa Mathem.*, N° 2722 et seq.

ticalement : si l'on présente le bord aigu *c* de cette lame à un faisceau de lumière *dmke*, dirigé horizontalement, la lame attirera les rayons *de*, *fh*, qui s'infléchiront vers elle de moins en moins, à mesure qu'ils seront plus éloignés, ensorte qu'à une certaine distance, qui déterminera la limite de l'attraction, il y aura un rayon *gi* qui passera sans inflexion : au-delà de ce terme, l'attraction se changera en répulsion, et les rayons ultérieurs *lk*, *mn* s'infléchiront en sens opposé, de manière que *lk* croisera *mn*, pour obéir à la force qui le repousse à une plus grande distance.

924. Supposons maintenant que l'on place vis-à-vis de la lame *acb* (*fig.* 118) une autre lame semblable *a' c' b'*, qui tourne vers elle son bord aigu, et que l'on introduise dans l'espace intermédiaire un faisceau de lumière *de e'd'* ; si la distance entre *c* et *c'* est d'abord un peu considérable, comme $\frac{1}{10}$ de pouce, chacun des deux tranchans n'aura aucune action sur les rayons repoussés par l'autre, et tout se passera, par rapport à chaque tranchant, comme dans le cas d'une seule lame. On s'est dispensé de représenter ici les rayons repoussés qui sont censés se confondre avec la lumière directe *op*, *rs*. Si l'on reçoit le faisceau sur un plan AB, il y produira une tache blanche, aux deux côtés de laquelle la lumière s'épanouira sous la forme d'une espèce de frange, par une suite de l'inflexion des rayons dans le voisinage des tranchans.

Que l'on rapproche ensuite les deux lames, en diminuant l'espace *cc'* ; tant que les rayons attirés ou repoussés par chaque tranchant seront hors de la sphère d'activité de l'autre, ceux qui passaient le plus près des tranchans, tels que *de*, *d'e'*, se trouvant interceptés, et cette perte n'étant compensée par aucun accroissement de force ; la tache blanche se contractera. Si l'on continue de rapprocher les deux lames, il y aura un terme où chacune repoussera les rayons sur lesquels l'autre agit par attraction, ce qui augmentera les inflexions de ces rayons ; ensorte que les franges lumineuses se rapprocheront de plus en plus des points A, B, et que l'espace inter-

médiaire s'élargira. En même temps cet espace s'obscurcira vers le milieu, parceque les rayons directs qui l'éclairaient en cet endroit se détourneront à droite et à gauche, par l'effet de la double force qui les sollicite.

Ces expériences sont très-intéressantes, en ce qu'on y voit la répulsion succéder à l'attraction, qui devient zéro dans le point où les rayons passent en ligne droite, et au-delà duquel les quantités négatives remplacent les positives.

L'action des deux forces ne se borne pas à changer la direction des rayons, elle décompose la lumière; ensorte que les franges présentent différentes séries de couleurs, à peu près comme dans le phénomène des anneaux colorés que nous exposerons à l'article des couleurs.

L'effet dont nous venons de parler a été appelé par plusieurs physiciens *diffraction de la lumière*. Newton lui a conservé le nom d'*inflexion*, et l'attribue à la même cause générale qui produit la réflexion et la réfraction.

3. De la Lumière décomposée, ou des Couleurs.

925. Les rayons que les corps lumineux envoient immédiatement vers nos yeux, nous apportent les images de ces corps accompagnées de cette vive clarté que nous désignons souvent par l'expression même de *lumière*. Ceux de ces rayons qui sont réfléchis par les corps susceptibles de les repousser, viennent de même nous avertir de la présence de ces derniers corps, en nous offrant leurs images, mais sous une apparence particulière que nous exprimons par le mot de *couleur*. Les physiciens en ont conclu que la réflexion ne se bornait pas à renvoyer vers nous les rayons dans le même état où ils sont reçus par la surface réfléchissante, et qu'il faut que cette surface ait une certaine disposition propre à modifier l'action des rayons, et en vertu de laquelle ils nous font appercevoir les images des corps comme parées et habillées de leurs couleurs. Mais en quoi consiste

consiste cette espèce de modification, soit qu'on la considère dans les rayons eux-mêmes, ou dans les objets qui la déterminent ? De quelle nature est cette puissance, dont l'inépuisable fécondité donne naissance à ces teintes si diversifiées, qui distinguent les surfaces des différens corps, et qui admettent entre elles des gradations de nuances si délicates, souvent réunies et comme fondues ensemble dans la coloration d'un même corps ? Telles sont les questions importantes dont nous devons la solution aux découvertes de Newton.

Des Couleurs considérées dans la Lumière.

Tant que l'on a regardé la lumière comme homogène, et ses rayons comme indifférens par eux-mêmes par rapport à telle ou telle couleur, on a attribué la diversité des couleurs à celle des mouvemens que les molécules des corps imprimaient aux rayons réfléchis sur leur surface, ou réfractés dans leur intérieur. Quelques physiciens, assimilant les couleurs aux sons, les faisaient consister dans la fréquence plus ou moins grande des vibrations de la matière subtile qui leur servait comme de véhicule.

926. Cependant Grimaldi avait remarqué qu'un rayon solaire se dilatait en passant à travers le prisme ; mais il regardait cette dilatation comme l'effet d'une cause accidentelle, qui agissait de la même manière sur tous les rayons : ainsi, après avoir fait une observation importante, il passa à côté du but, et céda le prisme à Newton.

Cet instrument, manié par une main si habile, et suivi dans tous ses résultats par l'œil du génie, a servi à dévoiler enfin la vraie théorie des couleurs. Newton a développé lui-même cette théorie dans son *Traité d'Optique*, où le physicien paraît avec tant de dignité à côté du géomètre, déjà immortel par la théorie de l'attraction, et où l'on admire partout ce choix heureux d'expériences décisives, cet art de les placer dans l'ordre où elles s'éclairent mutuellement, et cette justesse de raisonne-

ment qui ne présente, dans les conséquences, que la traduction fidèle du langage des faits.

Notions sur le Prisme qui sert à décomposer la Lumière.

927. Avant d'exposer les résultats des expériences dont il s'agit, il ne sera pas inutile de donner quelques notions générales sur la forme et sur les effets du prisme qu'on emploie pour les faire. Ce prisme est droit et triangulaire; on le fait ordinairement de verre blanc, que l'on choisit le plus exempt qu'il est possible de bulles, de veines et autres défauts semblables; ses faces latérales doivent être exactement planes et d'un beau poli; l'angle formé par les deux faces, dont l'nne reçoit le rayon de lumière qui se réfracte dans le prisme, et l'autre lui offre une issue à son retour dans l'air, se nomme l'*angle réfringent* du prisme.

928. Nous avons vu (869) qu'un rayon de lumière qui pénètre un milieu terminé par deux faces parallèles, prend, en repassant dans l'air, une direction qui est elle-même parallèle à celle qu'il avait avant d'entrer dans le milieu. Il n'en est plus de même lorsque le milieu est un prisme dont les faces sont inclinées entre elles. Le rayon émergent fait nécessairement un angle avec le rayon incident. Il faut en excepter le cas où le rayon incident et la perpendiculaire au point d'incidence, sont dans un plan dont la section, avec la face sur laquelle tombe le rayon, est parallèle à l'arête qui passe par le sommet de l'angle réfringent. Car si l'on prolonge ce plan jusqu'à la rencontre de la face par laquelle sort le rayon, sa section avec cette face sera parallèle à la première section; et comme le rayon reste sur ce plan, il s'ensuit qu'il est ici dans le même cas que si les deux faces dont il s'agit étaient parallèles entre elles, et ainsi il sortira du prisme parallélement à sa première direction.

929. Supposons maintenant que *abc* (*fig.* 120) représente une tranche infiniment mince du prisme, située dans un plan perpendiculaire à l'axe; que *b* soit le point qui appartient à

l'angle réfringent, et *hg* le rayon incident. Si l'on fait tourner le prisme autour de son axe, tandis que le rayon *hg* reste fixe, et si tel est le mouvement de ce prisme, qu'il détermine le rayon émergent *nm* à s'abaisser de plus en plus au-dessous de sa première position, on arrivera à un terme, passé lequel l'extrémité *m*, qui jusqu'alors était descendue, commencera au contraire à monter. Ce terme aura lieu lorsque le rayon émergent *nm* fera, avec la perpendiculaire *or*, un angle *mnr* égal à l'angle *hgs*, formé par le rayon incident *hg* avec la perpendiculaire *ps*; d'où il suit que les angles *anm*, *cgh*, que feront les deux rayons avec les faces correspondantes du prisme, seront pareillement égaux. Si le point *b* était tourné vers le haut, les mouvemens du rayon *nm* se feraient en sens contraire de ceux dont nous avons parlé (1).

---

(1) Il paraît singulier que, pendant un même mouvement du prisme, l'image fasse deux monvemens successifs en sens contraire. Pour éclaircir cette espèce de paradoxe, supposons que *acb* (*fig.* 121) représente un prisme tellement situé, que *yr* étant le rayon incident, le rayon réfracté *st* fasse des angles inégaux avec les côtés *bc*, *ba*. Dans le cas que nous prenons ici pour exemple, *bsr* est le plus petit de ces deux angles, et le rayon *rs*, après son émergence, se relève suivant une direction *st*, qui fait avec *ab* un angle plus aign que l'angle *yrc*.

Ayant mené *bg* perpendiculaire sur la base *ac* du triangle isocèle *abc*, concevons que le rayon réfracté *rs* tourne peu à peu autour de son point d'intersection o avec *bg*, de manière que son extrémité *r* s'élève, tandis que son extrémité *s* s'abaissera, et qu'en même temps le rayon incident *yr* et le rayon émergent *st* varient dans leurs positions, par des degrés analogues à la réfraction du prisme. Pendant ce monvement, il y aura un terme où le rayon *rs* parviendra à nne position *r's'* également inclinée de part et d'autre sur *bc* et *ba*. Or, il est évident qu'à ce terme, le rayon incident *y'r'* et le rayon émergent *s't'* feront aussi des angles égaux avec les mêmes côtés *bc* et *ba*. Concevons enfin que le rayon *r's'* continue son mouvement, toujours dans le même sens. Il arrivera à un nouveau terme où il prendra la même position *r"s"* en sens contraire, que quand il était dirigé suivant *rs*, d'où il suit que l'on aura *bs"r"* = *brs*, et *br"s"* = *bsr*. Alors l'angle que forment entre eux le rayon incident *y"r"* et le rayon émergent *t"s"*, prolongés jusqu'à ce qu'ils se rencontrent, est égal à l'angle qu'ils formaient, lorsqu'ils avaient les directions *yr* et *ts*.

Cet angle, en allant d'un terme vers l'autre, varie continuellement, de

La position qui donne l'égalité entre les angles *anm*, *egh* doit donc être regardée comme la limite de toutes les autres positions. Or, on sait que quand une quantité varie en allant vers sa limite, ses variations diminuent de plus en plus, à mesure qu'elle-même s'approche de la limite, de manière qu'il y a un petit espace en deçà et au delà, où elle peut être regardée comme sensiblement constante. Il en est de ces sortes de quantités à peu près comme de la longueur du jour, qui augmente par des degrés presque insensibles, lorsque le soleil n'est plus qu'à une petite distance des Tropiques, qui sont les limites de son mouvement dans l'Ecliptique.

Il résulte de là que dans les positions du prisme qui avoisinent celle où les réfractions des rayons *mn*, *gh* sont égales de part et d'autre, le rayon *mn* reste presque parallèle à lui-même, de manière que son extrémité *m* est à peu près stationnaire pendant un instant. Ces différentes notions nous seront utiles pour la suite.

---

manière que d'abord il augmente, jusqu'à ce que le rayon réfracté ait pris la position *r's'*, qui répond au *maximum* du même angle, après quoi il diminue par des degrés inverses de ceux qui ont déterminé son accroissement.

Imaginons maintenant que le rayon incident *yr* restant fixe, ce soit le prisme qui tourne autour du point o, en s'abaissant par son extrémité *o*, de manière à prendre la position *a'c'b'* (*fig.* 122), et successivement toutes les autres qui résultent de ce même mouvement. Cette rotation du prisme produira la répétition des mêmes angles entre *bc* et *yr*, que ceux qui ont lieu dans l'hypothèse précédente, en vertu du déplacement du rayon réfracté *rs*. Donc l'angle formé par *yr* et *st* ira de même d'abord en augmentant, jusqu'à la limite dont nous avons parlé, et commencera ensuite à décroître, pour retourner vers sa valeur primitive; et ainsi cet angle subira tour à tour des variations en sens contraire, pendant que le côté *bc* du prisme continuera de s'incliner de plus en plus dans le même sens. Donc si l'on considère le point *t* comme le lieu de l'image, on conclura de ce qui vient d'être dit, que cette image a dû commencer par descendre, tandis que l'angle formé par le rayon mobile *ts* avec le rayon fixe *yr* augmentait, et qu'ensuite elle a dû remonter pendant la diminution du même angle. *Voyez* pour la démonstration du *maximum*, *Newtonis Opusc.*, t. II, p. 157, propos. 25, et le Traité d'Optique de Lacaille; nouv. édit., Paris, 1802, augmentée par plusieurs Elèves de l'Ecole Polytechnique, p. 46 et suiv.

Expériences sur la Lumière réfléchie par les Corps opaques.

930. Newton, avant de présenter le prisme à l'action de la lumière qui vient immédiatement du soleil, pour analyser physiquement ce fluide, commença par tâter en quelque sorte son sujet, en faisant des expériences préliminaires sur les rayons que réfléchissent les corps opaques colorés. Dans cette vue, il prit un papier épais, taillé en forme de rectangle, et d'un noir foncé. Ayant divisé le rectangle en deux moitiés, par une ligne parallèle à ses petits côtés, il teignit une moitié en rouge et l'autre en bleu; ces deux couleurs étaient elles-mêmes très-chargées et avaient une forte intensité. Le papier était placé devant une fenêtre (1), de manière que les deux grands côtés du rectangle fussent parallèles à l'horizon, et que la ligne qui le divisait fût perpendiculaire au plan de la fenêtre; de plus, l'angle formé par la lumière, qui allait de la fenêtre au plan de papier, était égal à celui que faisait le même plan avec les rayons réfléchis vers l'œil. Les choses étant ainsi disposées, Newton regarda le papier à travers un prisme dont l'axe était aussi parallèle à l'horizon, et voici ce qu'il observa. Lorsque l'angle réfringent du prisme était tourné en haut, auquel cas la réfraction relevait l'image du papier au-dessus de sa première position, la moitié teinte en bleu paraissait elle-même plus élevée que celle qui était colorée en rouge : c'était le contraire lorsque l'angle réfringent regardait la terre; la position du bleu, dans ce cas, était plus basse que celle du rouge. Newton conclut de cette première expérience, que les rayons

(1) Pour que cette expérience réussisse, il faut que le papier soit à une médiocre distance de la fenêtre, comme de 25 centimètres, et qu'il se trouve vis-à-vis le mur d'appui qui est en dessous de la fenêtre, pour tempérer l'effet de la lumière, qui ferait paraître sur le papier toutes les différentes espèces de couleurs dont nous parlerons bientôt, ce qui offusquerait les couleurs dont ce papier est peint.

qui venaient de la moitié teinte en bleu étaient plus réfrangibles que ceux qui partaient de la moitié teinte en rouge ; car il était bien évident que les grands côtés du papier étant parallèles aux arêtes du prisme, les rayons des deux couleurs qui provenaient des soudivisions de ces mêmes côtés et de celles de toutes les lignes intermédiaires, se trouvaient précisément dans les mêmes circonstances à l'égard du prisme ; ensorte que s'ils eussent subi des réfractions égales, tous les points de l'image qui répondaient à chacun des grands côtés du papier et à chacune des lignes intermédiaires, auraient dû paraître à la même hauteur (1).

931. Newton entoura ensuite, à plusieurs reprises, le même papier d'un fil de soie très-noir, ensorte que les différentes parties de ce fil paraissaient être autant de lignes noires tracées sur le papier. Il plaça le papier près d'un mur, dans une position verticale, l'une des couleurs étant à droite et l'autre à gauche. Ayant choisi la nuit pour le temps de son expérience, il mit en devant du papier, et à une très-petite distance, une bougie allumée, dont la flamme répondait à la jonction des deux couleurs, et dépassait tant soit peu, par sa pointe, le bord inférieur du papier : enfin, il dressa sur le plancher, à l'opposé du papier et à une distance d'environ six pieds, un verre lenticulaire qui rassemblait les rayons partis des différens points du papier, de manière que leurs points de concours, derrière la lentille, se faisaient à la même distance d'environ six pieds, d'où il arrivait que l'image du papier coloré se peignait sur un autre papier placé à l'endroit de ces points de concours, comme les images des objets extérieurs se peignent au fond de la chambre obscure.

Newton, en faisant mouvoir le second papier, tantôt vers la lentille, tantôt du côté opposé, cherchait la distance où l'image de chaque partie colorée du papier fixe avait le plus de netteté, et il jugeait qu'il était parvenu à cette distance, lorsque les images des fils tendus sur le papier étaient elles-

(1) *Optice* (*Lucis*, lib. I, pars 1, propos. 1, theor. 1.

mêmes nettement terminées : or, à l'endroit où le rouge était devenu très-distinct, le bleu ne se voyait que confusément, desorte que l'on appercevait à peine les lignes qui le traversaient, et réciproquement le terme où le bleu ressortait dans toute sa force, n'offrait qu'une image faiblement exprimée du rouge et des lignes noires auxquelles il servait de fond. Ce second terme avait lieu à une distance de la lentille moindre d'environ un pouce et demi que celle qui répondait à la vision distincte du rouge ; et puisque l'incidence des rayons sur la lentille était la même dans les deux cas, il s'ensuivait que les rayons bleus se réfractaient davantage que les rouges.

932. Il n'est pas nécessaire, pour le succès des expériences, que l'appareil soit disposé précisément comme il a été indiqué : par exemple, dans la première, on réussira de même en inclinant le prisme et le papier à l'horizon. Mais les positions adoptées par Newton sont celles où le phénomène marque davantage, et en général il a ramené toutes ses expériences à ces espèces de termes fixes, qui, par une manière d'opérer plus soignée et plus précise, conduisent à des résultats mieux prononcés. Newton ne prétend pas non plus que toute la lumière qui vient de la partie du papier colorée en bleu soit plus réfrangible que celle qui vient de la partie rouge. On verra dans la suite que chacune de ces deux couleurs est mêlée de rayons, qui sont eux-mêmes différemment réfrangibles ; mais ce mélange, qui n'est que léger, n'empêche pas que l'effet principal ne domine dans le phénomène.

Décomposition de la Lumière solaire.

933. De ces expériences qui ont servi à Newton comme d'entrée, il passe à celles dont l'objet est la lumière envoyée immédiatement par le soleil. Voici en quoi consiste la première : Newton introduisit un rayon solaire par une ouverture d'environ 4 lignes, ou 9 millimètres de diamètre, pratiquée au volet d'une chambre obscure ; il plaça auprès de cette ouverture un prisme de verre, ensorte que le rayon solaire,

après sa réfraction à travers le prisme, allait projeter, sur le mur opposé à la fenêtre, l'image colorée qui est connue sous le nom de *spectre solaire*. L'axe du prisme était perpendiculaire à la direction du rayon, et Newton, en faisant tourner lentement le prisme autour de cet axe, voyait le spectre descendre et monter alternativement sur le mur. Dans le passage d'un mouvement à l'autre, il y avait un instant où le spectre paraissait stationnaire ; et l'on jugera, d'après ce que nous avons dit plus haut, que telle était alors la position du prisme, que les réfractions des rayons incidens et celles des rayons émergens étaient égales de part et d'autre. Newton fixa le prisme dans cette même position, qu'il adopta en général pour toutes ses expériences (1).

934. L'image du soleil, peinte sur le mur opposé à la fenêtre, avait une figure oblongue, dont les bords latéraux étaient deux lignes droites assez distinctes, et les deux extrémités supérieure et inférieure deux demi-cercles mal terminés, dont les couleurs se dégradaient et s'effaçaient insensiblement. La largeur de l'image se trouvait en rapport avec la grandeur apparente du diamètre du soleil ; car elle était de 2 pouces $\frac{1}{8}$, y compris la pénombre ; d'ailleurs elle se trouvait éloignée du prisme de 18 pieds $\frac{1}{2}$. Or, en retranchant de cette largeur le diamètre de l'ouverture faite au volet, qui était d'un quart de pouce, et en mesurant l'angle qui, ayant son sommet tourné vers le prisme, était sous-tendu par la largeur ainsi réduite, on trouvait cet angle d'environ $\frac{1}{2}$ degré, ce qui est la mesure du diamètre apparent du soleil.

935. Pour concevoir ceci, supposons que la *fig.* 123 représente, en projection horizontale, tout ce qui concerne le phénomène ; que *st* soit le diamètre du soleil, *on* celui de l'ouverture faite au volet ; *snz*, *tor*, deux rayons qui, en partant des extrémités du diamètre du soleil, aillent, après s'être croisés en *y*, passer par les extrémités de l'ouverture ; *soe*, *tnh*, deux autres rayons qui aillent directement vers les mêmes

(1) *Optice Lucis*, lib. I, propos. 2, theor. 2.

extrémités ; enfin, soit *rz* la ligne à laquelle ces différens rayons aboutissent sur le mur ; la pénombre sera mesurée par les lignes *er*, *hz*.

Soit maintenant *abcd* la projection du prisme ; cette projection sera un rectangle, à cause de la position horizontale de ce prisme. D'une autre part, il est clair que les rayons rompus et les rayons émergens resteront dans ce même plan, et que de plus ils sortiront du prisme parallélement à leurs premières directions; et comme les rayons incidens rencontrent le prisme presque perpendiculairement, à cause de la petitesse de l'angle qu'ils font entre eux, on pourra supposer, sans erreur sensible, que les rayons émergens restent sur les directions prolongées des rayons incidens.

Or, Newton ayant retranché de la largeur *rz* de l'image, la partie *gr* égale à *on*, trouva que l'angle *gnz*, qui est sensiblement égal à l'angle *ryz* (1) ou à l'angle *syt*, était d'environ un demi-degré. Il en était tout autrement de l'image considérée relativement à sa longueur ; elle avait dans ce sens environ 10 pouces $\frac{1}{4}$, et l'angle réfringent du prisme qui avait servi à l'expérience, était d'environ 64^{d}. Avec un prisme dont l'angle réfringent était moindre, la longueur de l'image se trouvait diminuée ; mais la largeur restait la même.

En faisant tourner le prisme sur son axe, de manière que les rayons émergens devinssent plus obliques à la face du prisme par laquelle ils sortaient, on voyait l'image s'accroître d'environ 2 pouces ou davantage dans le sens de sa longueur.

Si l'on faisait faire au prisme un mouvement contraire, qui augmentât l'obliquité des rayons incidens sur la surface du prisme par laquelle ils entraient, on voyait l'image se contracter d'un ou deux pouces, et toujours dans le sens de la hauteur.

936. Or, suivant les lois d'optique reçues jusqu'alors, la longueur de l'image, devenue stationnaire, aurait dû être égale à sa largeur, c'est-à-dire, que l'image aurait dû se

(1) C'est une suite de ce que *gn* est parallèle à *ro*.

présenter sous une figure circulaire ; car soit *acb* (*fig.* 124) une coupe verticale du prisme, *rf*, *xm* deux rayons incidens partis des extrémités du diamètre du soleil pris aussi dans le sens vertical, et qui se croisent avant de passer par l'ouverture faite au volet ; de plus, soient *mh*, *fi* les rayons rompus, *hp*, *iu* les rayons émergens, et *pu* la longueur de l'image peinte sur le mur.

937. Nous avons dit (929) que quand l'image est devenue stationnaire, les réfractions sont égales de part et d'autre. Cette limite se rapporte à un point *t* (*fig.* 125) situé à peu près au milieu de l'image, et qui répond au rayon *yrst*, dont la réfraction est moyenne entre celles de tous les autres rayons situés en dessus et en dessons, de manière que c'est le rayon émergent *st* qui est incliné sur *ac*, de la même quantité que le rayon incident *yr* sur *bc*, et que l'on regarde l'image comme stationnaire, quand le point *t* cesse de monter ou de descendre pendant les deux mouvemens contraires que l'on fait faire au prisme.

Or, dans l'hypothèse où tous les rayons seraient également réfrangibles, la réfraction en *m* serait égale à celle en *i*, et la réfraction en *f* serait égale à celle en *h* ; d'où il suit que l'inclinaison des rayons émergens *hp*, *iu*, l'un sur l'autre, serait la même que celle des rayons incidens *ym*, *yf*, c'est-à-dire, d'environ $\frac{1}{5}$ degré ; et comme le petit écart que les rayons *mh*, *fi* auraient subi dans l'intérieur du prisme pourrait être négligé, parceque les rayons incidens sont presque parallèles, il en résulte que, dans la même hypothèse, la longueur de l'image devrait être égale à sa largeur, c'est-à-dire, que l'image devrait paraître circulaire. Donc, puisqu'elle est cinq fois plus longue que large, il est nécessaire que les rayons *ym*, *yf*, et leurs intermédiaires, soient différemment réfrangibles, et que ceux qui forment la partie supérieure *p* de l'image (*fig.* 124), le soient plus que ceux qui forment la partie inférieure (1).

(1) Soit *rs* (*fig.* 126) un rayon réfracté, situé dans la même position que

938. Or, telle était la distribution des couleurs de l'image, que son extrémité *p* la plus réfrangible présentait le violet, et que le rouge paraissait à l'extrémité opposée *u*, dont la réfraction était plus petite ; les parties intermédiaires, en partant du rouge, offraient successivement l'orangé, le jaune, le vert, le bleu et l'indigo.

Si l'on écartait le prisme à une certaine distance de l'ouverture faite au volet, et qu'on regardât cette ouverture à travers le prisme disposé comme dans l'expérience précédente, on voyait de même une image oblongue et colorée, dans laquelle la couleur la plus réfrangible était le violet, et la moins réfrangible le rouge ; les couleurs intermédiaires, en partant du violet, étaient de même l'indigo, le bleu, le vert, le jaune et l'orangé.

939. Il résultait de ces expériences que, toutes choses égales d'ailleurs, les rayons de la lumière diffèrent notablement entre eux par leurs degrés de réfrangibilité. Mais d'où provenait cette

---

fig. 125, ensorte qu'il y ait égalité entre les angles *cry* et *ast*. Soient *hm*, *if* (*fig.* 126) deux autres rayons réfractés qui se croisent entre eux et avec le rayon *rs*, en faisant des angles égaux *bhm*, *bfi* avec les côtés du prisme, d'où il résulte que les angles *bmh*, *bif* seront aussi égaux. Par une suite nécessaire, il y aura de même égalité entre les angles *cfy''*, *ahp*, que le rayon incident qui appartient à *if* et le rayon émergent qui appartient à *hm* feront avec les côtés correspondans du prisme, ainsi qu'entre les angles *cmy'* et *aiu* ; et il est évident que *fy''* et *my'* d'une part, et *hp* et *iu* d'une autre part, seront inclinés entre eux d'une même quantité. Supposons que cette inclinaison soit d'un demi-degré, et concevons que le rayon *yr* restant fixé, le rayon *y''f* et le rayon *y'm* se meuvent parallélement à eux-mêmes, l'un de haut en bas, l'autre de bas en haut, jusqu'à ce qu'ils aient pris les positions indiquées par la *fig.* 125, où leurs extrémités supérieures coincident en un même point avec le rayon fixe *yr*. Il est facile de juger que chacun des angles formé par *my* avec *fy*, et par *ph* avec *ui* sera encore d'un demi-degré, et qu'en même temps les angles *cfy*, *ahp* d'une part, et les angles *cmy*, *aiu* de l'autre seront encore égaux chacun à chacun. Or, telles seraient les routes que suivraient dans l'air et dans le prisme les trois rayons principaux, savoir, le rayon moyen *yrst*, et les deux extrêmes *ymhp* et *yfiu*, si la lumière était composée de rayons également réfrangibles ; d'où l'on voit que, dans cette hypothèse la longueur de l'image sontendrait, ainsi que sa largeur, un angle d'un demi-degré, ensorte que les deux dimensions se trouveraient sensiblement égales.

différence? Etait-elle l'effet d'une loi constante et uniforme qui modifiait diversement la réfraction des divers rayons? Fallait-il la regarder comme accidentelle? Enfin, devait-on adopter l'opinion de Grimaldi, suivant laquelle chaque rayon se dilatait et s'épanouissait en forme d'éventail? Ces questions restaient encore indécises, et il fallait en chercher la solution dans de nouvelles expériences.

Or, Newton jugea que si l'alongement de l'image avait pour cause la dilatation de chaque rayon, ou quelque autre déviation du même genre, l'image réfractée de nouveau dans le sens latéral s'étendrait sur une largeur égale à sa longueur. Pour éprouver l'effet de cette seconde réfraction, ayant laissé l'appareil disposé comme dans l'expérience précédente, il plaça un second prisme derrière le premier, mais de manière que les deux axes se croisaient à angle droit, et que la lumière réfractée de bas en haut par le premier, l'était ensuite dans le sens latéral par le second, et il remarqua que l'image conservait la même largeur; seulement elle avait pris une position un peu oblique à l'égard de la première.

Conséquences déduites des Expériences précédentes.

940. Les résultats que nous venons d'exposer avaient amené les choses au point où il ne restait plus qu'à en tirer les conséquences dont le développement se présentait comme de lui-même au génie de Newton. Essayons de tracer ici la marche de ses idées. Le faisceau de lumière qui passe par l'ouverture faite au volet de la fenêtre, est composé de rayons qui, par leur nature, ont différens degrés de réfrangibilité. Ce faisceau, reçu immédiatement sur le mur sans aucun prisme intermédiaire, y forme un cercle lumineux où les extrémités de tous ces rayons, différemment réfrangibles, sont partout reunies et mêlées les unes avec les autres. Placez à la rencontre de la lumière un prisme dont l'axe soit parallèle à l'horizon, l'effet de la réfraction horizontale étant de faire sortir les rayons pa-

rallélement à leurs premières directions, quel que soit leur degré de réfrangibilité, il n'en résultera aucune séparation sensible des rayons dans ce même sens. Mais les rayons situés dans un même plan vertical rencontrant, sous différentes inclinaisons, les deux faces du prisme qui forment l'angle réfringent, se démêleront les uns des autres par l'effet de la réfraction. Les plus réfrangibles de tous, s'ils existaient seuls, iraient former, à une certaine hauteur, sur le mur opposé, une image circulaire ou à peu près. Les moins réfrangibles, si de même ils existaient seuls, s'offriraient sous l'aspect d'un cercle dont la position serait sensiblement plus basse que celle du premier. Imaginez entre ces deux cercles une infinité d'autres cercles projetés par des rayons, dont les réfrangibilités forment une série de degrés intermédiaires entre ceux qui appartiennent aux deux cercles extrêmes, et concevez de plus que tous ces différens cercles tombent à la fois sur le mur; leurs centres se trouveront sur une même ligne verticale, à de petites distances les uns des autres, et les cercles eux-mêmes se recouvriront mutuellement en grande partie, desorte que leur assemblage formera une image oblongue dont les extrémités seulement paraîtront circulaires.

941. Maintenant recevez les rayons sortis du prisme, sur une des faces d'un second prisme, dont l'axe soit vertical, et dont la position soit telle, qu'il y ait égalité entre la réfraction des rayons incidens et celle des rayons émergens. Les rayons qui appartiennent à chaque cercle, étant tous également réfrangibles, sortiront du second prisme dans le même ordre où ils étaient entrés; seulement la réfraction les rejettera de côté, de manière que le cercle qu'ils projetteront sur le mur aura sa nouvelle position un peu à droite ou à gauche de la précédente, et cela d'autant plus que le même cercle sera produit par des rayons qui auront un plus grand degré de réfrangibilité. Supposons qu'en conséquence de la position du second prisme la déviation de chaque cercle se fasse de droite à gauche, et concevons une ligne verticale tracée sur le mur et qui passe par les centres des différens cercles, dont était composée l'image

provenue du seul prisme horizontal : le centre du cercle produit par les rayons les plus réfrangibles sera le plus écarté de cette verticale, en vertu de la réfraction dans le second prisme ; le cercle qui subira le plus petit écart sera celui qui appartient aux rayons les moins réfrangibles, et tous les centres des cercles intermédiaires s'éloigneront plus ou moins de la verticale, vers la gauche, suivant que les rayons qui produisent ces cercles seront plus ou moins réfrangibles ; d'où il suit que les différens centres se trouveront sur une ligne oblique. On concevra de même que la longueur de l'image doit être un peu augmentée, puisqu'elle se trouve renfermée entre les mêmes lignes horizontales qu'auparavant, et que d'ailleurs elle est inclinée par rapport à ces lignes.

Newton ayant placé un troisième prisme, et même un quatrième, derrière le second, pour multiplier les réfractions latérales, a toujours obtenu le même résultat, sans aucun accroissement sensible de l'image dans le sens de la largeur.

De nouvelles expériences, dont le détail nous mènerait trop loin, viennent à l'appui des précédentes ; et quelle force la vérité n'emprunte-t-elle pas de leur ensemble, lorsqu'il n'en est aucune qui, considérée en elle-même, ne parût pouvoir se passer des autres !

Décomposition de la Lumière réfléchie par la dernière Surface des Corps transparens.

942. Il nous reste à parler des expériences qui ont eu pour objet la lumière réfléchie au contact de la dernière surface des corps diaphanes et de l'air ; et ce n'est encore ici qu'une surabondance de preuves. Newton ayant choisi un prisme triangulaire, dont l'angle réfringent était de $90^{d.}$, et chacun des deux autres de $45^{d.}$, reçut un rayon solaire sur une des faces qui formaient l'angle réfringent, et telle était la position du prisme, que les rayons émergens sortaient par sa base, qui regardait l'horizon. Or, suivant ce que nous avons dit précédemment (887),

une partie des rayons qui rencontraient cette base se réfléchissait sur sa surface intérieure, et sortait par l'autre face de l'angle réfringent, tandis que la partie qui avait échappé à la réflexion se réfractait en repassant dans l'air. Les rayons réfléchis tombaient sur un second prisme, et, après s'être réfractés en le traversant, allaient former une image colorée sur un carton placé à la distance convenable (1).

A mesure que Newton faisait tourner le premier prisme sur son axe, les différentes couleurs de l'image augmentaient successivement d'intensité, en commençant par le violet et en finissant par le rouge; et voici les conséquences qui résultaient de cette gradation.

943. Les rayons qui renforçaient chaque couleur ne produisaient cet effet qu'en se dérobant à la réfraction qui avait lieu à la sortie du premier prisme, et en se mêlant aux rayons réfléchis qui allaient se rendre au second prisme; et le moment où le ton de couleur parvenait à son plus haut degré, était celui où la réfraction des rayons qui appartenaient à cette même couleur, se changeait en réflexion totale (887) (2). On voit par là que la lumière réfléchie sur la base intérieure du prisme s'associait, l'un après l'autre, des rayons additionnels relatifs aux différentes couleurs, en allant du violet au rouge, c'est-à-dire, en commençant par les rayons les plus réfrangibles, et en finissant par ceux qui l'étaient le moins. Ainsi, dans cette expérience, la lumière réfléchie se composait graduellement de rayons diversement réfrangibles. Or, cette lumière ne différait en aucune manière de celle des rayons incidens qui venaient directement du soleil, puisque la réflexion n'est qu'une simple déviation de la lumière, qui n'altère point sa nature. L'expérience dont il s'agit servait donc à confirmer,

(1) *Optice Lucis*, lib. I, pars 1, exper. 9.

(2) Il est évident que l'inclinaison du prisme requise pour la réflexion totale des rayons de chaque couleur, variait suivant la diversité des couleurs, ensorte qu'à chaque degré d'inclinaison répondait un *maximum* d'intensité relatif à une couleur particulière.

en quelque sorte, par la voie de synthèse, ce que les précédentes avaient établi par une opération contraire que l'on pourrait comparer à l'analyse.

La même expérience faisait voir que les rayons les plus réfrangibles étaient aussi les plus disposés à se réfléchir, et que les moins réfrangibles étaient ceux qui avaient le moins de tendance à la réflexion.

Gradation de Nuances, qui existe dans la Lumière.

944. Lorsque l'on parle en Physique de rayons *rouges*, *bleus*, *violets*, etc., on est bien éloigné de supposer que les rayons soient réellement colorés, et ce langage n'exprime autre chose qu'une certaine disposition de ces rayons, pour produire en nous les différentes sensations que nous désignons par ces mêmes noms de *rouge*, de *bleu*, de *violet*, etc. Les expériences que nous avons rapportées ne prouvent autre chose, sinon qu'il existe dans un faisceau de lumière, qui nous vient directement du soleil, une certaine quantité de rayons homogènes, propres à produire en nous l'impression du *violet*, et que nous appelons *rayons violets*, pour abréger; une autre quantité de rayons pareillement homogènes, qui seront les *rayons bleus*, et ainsi de suite; et de plus, ces expériences nous apprennent que les rayons *violets*, *bleus*, *verts*, etc., ont différens degrés de réfrangibilité, depuis les violets, qui sont les plus réfrangibles, jusqu'aux rouges, qui le sont moins que les autres.

Mais ici, comme dans un grand nombre d'autres phénomènes naturels, la loi de continuité a lieu, c'est-à-dire, que la réfraction va en diminuant, par des différences imperceptibles, depuis le violet jusqu'au rouge; et ainsi, le cône de lumière qui traverse le prisme s'y résout en une infinité de cônes, dont les axes font entre eux de très-petits angles, d'où il arrive que les bases se recouvrent, en grande partie, dans l'image colorée qui se forme de leur ensemble. La couleur des rayons varie de même par nuances d'un cône à l'autre, de manière que ces nuances peuvent être rapportées à sept espèces principales de couleurs,

couleurs, qui sont le violet, l'indigo, le bleu, le vert, le jaune, l'orangé et le rouge. Newton s'exprime à cet égard dans les termes les plus clairs (1) ; quoiqu'à en juger par l'exposé que la plupart des physiciens ont fait de sa théorie, il semble n'avoir admis dans la lumière que sept couleurs bien tranchées, qui se succèdent entre elles par un passage subit.

Couleurs du Spectre solaire ramenées à leur plus grande simplicité.

945. Le mélange de toutes ces nuances, qui anticipent les unes sur les autres dans l'image colorée produite par la réfraction, rend cette image nécessairement très-composée. S'il est possible, par quelque moyen, de diminuer considérablement le diamètre des cercles, le mélange, par une suite nécessaire, deviendra beaucoup moins sensible ; car on conçoit aisément que si plusieurs cercles s'entre-coupent mutuellement, et que, sans changer les positions des centres, on rétrécisse les circonférences, les parties communes diminueront à proportion, puisque les cercles approcheront davantage du terme où leurs circonférences ne feraient plus que se toucher.

Pour remplir cet objet, du moins en grande partie, on pratique une petite ouverture au volet d'une fenêtre, et à quatre mètres, ou environ douze pieds, du volet, on place un verre lenticulaire, puis au-delà de ce verre un carton blanc, éloigné convenablement pour que la lumière, réfractée par la lentille, puisse peindre nettement sur ce carton l'image de l'ouverture pratiquée au volet de la fenêtre : or, l'effet de cette lentille est de contracter d'une quantité considérable l'image dont il s'agit. Enfin, on dispose derrière la lentille, à une petite distance, un prisme qui projette de côté, ou de bas en haut, l'image colorée du soleil. Alors les différens cercles qui composent cette image étant eux-mêmes considérablement diminués de gran-

(1) *Optice Lucis*, lib. I, pars 1, propos. 2, exper. 6. *Ibid.*, pars 2, propos. 2, theor. 2.

deur, se dégagent les uns des autres, et cela d'autant plus que la largeur de l'image est plus petite par rapport à sa longueur. Newton est parvenu à rendre l'image soixante et douze fois plus longue que large, ensorte que l'on pouvait regarder chacune des couleurs de cette image comme approchant beaucoup de la simplicité et de l'homogénéité (1).

Effectivement les couleurs, dans cet état, ne peuvent plus être sensiblement changées par aucune réfraction. Par exemple, si l'on reçoit l'image colorée sur un carton noir, percé d'une petite ouverture circulaire d'environ quatre millimètres ou deux lignes de diamètre, et qu'ayant fait passer à travers un second prisme la portion de l'image transmise par cette ouverture, on la fasse tomber perpendiculairement sur un autre carton de couleur blanche, on ne remarque aucune différence entre sa longueur et sa largeur, et elle paraît être d'une figure exactement circulaire; ce qui prouve que tous les rayons qui la composent se sont réfractés régulièrement et de la même quantité.

946. Les couleurs dont la lumière est l'assemblage, ne sont pas plus susceptibles d'être changées par la réflexion que par la réfraction. Car, si l'on expose, par exemple, à la lumière rouge du spectre, des corps de différentes couleurs blanche, rouge, jaune, verte, bleue ou violette, tels que le papier, le vermillon, l'orpiment, l'émeraude, la fleur du bleuet, celle de la violette, ils paraîtront tous entièrement rouges. Les mêmes corps paraîtront bleus dans une lumière bleue, et verts dans une lumière verte (2). Toute la différence consiste en ce que chaque corps brille avec plus de vivacité, lorsque la couleur dans laquelle il est plongé coincide avec celle qu'il réfléchit par lui-même, tandis que la réflexion qui a lieu par l'intermède du spectre perd plus ou moins de sa force, lorsque les

(1) *Optice Lucis*, lib. I, pars 1, propos. 4, probl. 1, exper. 2.

(2) *Ibid.* lib. I, pars 2, exper. 5. *Newtonis Opusc.*, t. II p. 227 et 291.

deux couleurs sont distinguées l'une de l'autre. Ainsi l'éclat du cinabre est très-vif dans la lumière rouge; il l'est moins dans la lumière verte, et moins encore dans la lumière bleue.

Quant à la raison pour laquelle un corps change sa couleur naturelle, en une autre qu'on lui donne à réfléchir, elle provient de ce que chaque corps est propre à la réflexion de toutes les couleurs, mais de manière qu'il y en a une qui étant réfléchie beaucoup plus abondamment que les autres, devient prédominante.

Ainsi, toutes les observations concourent à nous faire regarder chacune des couleurs que présente le spectre solaire comme étant homogène; et puisque la réfraction et la réflexion sont les seuls moyens non-équivoques de consulter ici l'expérience, nous devons nous en tenir à un résultat qu'elle nous offre avec tous les caractères des vérités qui sont démontrées pour nous.

Différentes Réfrangibilités des Rayons diversement colorés.

947. Ici se présentait un nouveau sujet de recherches, pour comparer les lois des réfractions particulières que subissent les différentes couleurs de l'image, soit entre elles, soit avec la loi générale de la réfraction. Lorsque les physiciens avaient assuré, d'après l'expérience, que le sinus d'incidence était en rapport constant avec celui de réfraction, ils pensaient que tous les rayons de la lumière se réfractaient de la même quantité sous la même incidence; mais la vérité est que les rayons sont inégalement réfrangibles, et il faut regarder les résultats obtenus par les physiciens dont il s'agit, comme des espèces de moyens termes entre toutes les réfractions des divers rayons; de manière qu'on ne peut conclure autre chose de ces résultats, sinon que les rayons verts, qui répondent au milieu de l'image colorée du soleil, étant séparés des autres, doivent avoir leur angle de réfraction en rapport constant avec leur

angle d'incidence. Newton a fait des expériences directes qui prouvent que le rapport est de même constant pour les rayons de toutes les couleurs, et c'est ce que l'on peut démontrer rigoureusement par la Géométrie, d'après la supposition infiniment probable, que l'action des corps sur la lumière s'exerce perpendiculairement à la surface de ces corps ; car, dans cette hypothèse, on pourra appliquer à nue espèce quelconque de rayons, la démonstration générale que nous avons donnée, en parlant de la réfraction. (Note du n° 898).

948. Restait à déterminer le rapport particulier qui a lieu pour chaque espèce de lumière homogène, ou du moins la limite de ce rapport, et voici comme Newton y parvint. Il disposa un prisme à l'ordinaire, de manière à produire sur le mur opposé à la fenêtre une image colorée du soleil ; mais comme il était nécessaire, pour le succès de l'expérience, que les côtés rectilignes de cette image fussent terminés le plus nettement possible, Newton avait obtenu cet effet, en plaçant à l'ouverture par laquelle entrait la lumière, l'objectif d'un télescope.

Ensuite, par des observations réitérées, dans lesquelles il fut aidé par un ami qui avait l'œil exercé à bien distinguer les couleurs, il marqua sur l'image colorée les limites des sept couleurs principales, en menant les diamètres des deux cercles extrêmes, dont l'un donnait le violet et l'autre le rouge, puis en divisant l'espace intermédiaire en sept parties, par des lignes parallèles à ces diamètres : enfin, ayant prolongé l'un des côtés rectilig es de l'image au-delà du rouge, jusqu'à ce que le prolongement fût égal à la distance entre les diamètres des deux cercles extrêmes, il mesura la distance entre chaque ligne transversale et l'extrémité du prolongement, en commençant par le diamètre du cercle violet, et en allant successivement du violet au rouge, ce qui faisait en tout huit distances. Or, il trouva que ces distances étaient entre elles dans le rapport des nombres 1, $\frac{8}{9}$, $\frac{5}{6}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{5}$, $\frac{9}{16}$, $\frac{1}{2}$, et la série de ces nombres avait cette propriété singulière, qu'elle était semblable à celle qui représente les intervalles des sons

ut, *re*, *mi bémol*, *fa*, *sol*, *la*, *si*, *ut*, dont est formée notre échelle musicale, prise dans le mode mineur (1).

Il résulte de ce qui vient d'être dit, que la division de la ligne sur laquelle Newton avait marqué les limites des sept couleurs principales, était la même que dans un monocorde dont les différentes longueurs rendraient les sept sons de la gamme qui appartient au mode mineur. Cette conformité de rapports a fait penser à quelques physiciens qu'il y avait une analogie réelle entre les sons et les couleurs; mais c'est plutôt ici une analogie de rencontre, et il y a d'ailleurs de fortes raisons qui s'opposent à la prétention de faire chanter les couleurs.

949. Newton avait déterminé précédemment, à l'aide d'une autre expérience, le rapport entre le sinus de réfraction des rayons les moins réfrangibles du spectre solaire, et celui des rayons les plus réfrangibles, sous une même incidence. Si l'on désigne par 50 le sinus d'incidence, on aura 77 pour le sinus de réfraction des rayons rouges, et 78 pour celui des rayons violets.

Or, dans la division de l'image colorée, qui donnait les limites des couleurs voisines, les positions des lignes transversales, qui répondaient à ces limites, étaient déterminées par les points du mur sur lesquels tombaient les extrémités des rayons rompus relatifs aux mêmes limites; et à cause de la petitesse des angles que formaient entre eux ces rayons rompus, on pouvait prendre, sans erreur sensible, les distances entre les points du mur où ils aboutissaient, ou, ce qui revient au même, les distances entre les limites tracées sur l'image, pour les différences successives entre les sinus des angles de réfraction au passage du verre dans l'air; ainsi, en divisant la différence entre les nombres 77 et 78, en parties

(1) *Optice Lucis*, lib. I, pars 2, propos. 3, probl. 1, exper. 7 Le sixième rapport $\frac{9}{15}$ est un peu différent du rapport $\frac{8}{15}$ qui lui correspond dans notre gamme (494); il donne pour le *si* un son un peu plus bas que celui de cette gamme.

proportionnelles aux intervalles entre les limites des couleurs de l'image, on avait 77, 77 $\frac{1}{8}$, 77 $\frac{1}{5}$, 77 $\frac{1}{3}$, 77 $\frac{1}{2}$, 77 $\frac{2}{3}$, 77 $\frac{7}{9}$, 78, pour les expressions des sinus de réfraction des divers rayons relatifs à un même sinus d'incidence exprimé par 50. Il résultait de là que les sinus de réfraction des rayons rouges, relatifs à toutes les nuances de cette couleur, s'étendaient depuis 77 jusqu'à 77 $\frac{1}{8}$, ceux des rayons orangés depuis 77 $\frac{1}{8}$ jusqu'à 77 $\frac{1}{5}$, ceux des rayons jaunes depuis 77 $\frac{1}{5}$ jusqu'à 77 $\frac{1}{3}$, et ainsi de suite, pour les rayons verts, bleus, indigos et violets.

Nouvelle Preuve que la lumière n'est qu'un simple Mélange de Rayons hétérogènes.

950. Nous venons de voir qu'il y a, dans la lumière, des rayons d'une infinité de nuances différentes de couleurs, dont chacune est soumise dans sa réfraction à un rapport entre les sinus, qui lui est comme inhérent et qui ne souffre aucune altération. Ces rayons, qui diffèrent et par leurs teintes et par les quantités de leurs réfractions, doivent être considérés comme hétérogènes, puisque quand ils rencontrent tous à-la-fois, sous une même incidence, la surface d'un même milieu réfringent, ils éprouvent de la part de ce milieu différentes attractions qui supposent des diversités dans leur manière d'être. Le mélange de toutes les couleurs forme la lumière que nous appelons *blanche*, ensorte qu'il suffit de supprimer dans cette lumière quelqu'une des couleurs qui la composent, pour produire une couleur particulière qui variera suivant le nombre et les espèces de celles qu'on laissera subsister ; ainsi, lorsque l'on reçoit sur une lentille les rayons diversement colorés qui divergent au sortir du prisme, et que l'on place un carton blanc au-delà de cette lentille, à l'endroit où les rayons qu'elle a rendus convergens se réunissent en un foyer commun, le cercle lumineux qu'ils forment sur le carton est d'une couleur blanche ; les choses étant dans cet état, si l'on

place entre la lentille et le prisme un corps opaque qui intercepte une ou plusieurs des couleurs réfractées par le prisme, à l'instant la lumière blanche reçue par le carton fera place à une couleur ou simple, ou mélangée ; par exemple, si l'on intercepte le violet, le bleu et le vert, les autres couleurs ; savoir, le jaune, l'orangé et le rouge, formeront une couleur composée qui sera d'un beau jaune : supprimez, au contraire, les trois dernières couleurs, et vous aurez un mélange de violet, de vert et de bleu qui tirera sur la couleur verte. Dans toutes ces variations de couleurs, les rayons ne changent point de qualité ; ils n'agissent point les uns sur les autres ; ils ne font que se mêler en diverses proportions.

951. Ces conséquences se trouvent confirmées par une nouvelle expérience de Newton, dont il a puisé l'idée dans une observation très-connue. Voici en quoi elle consiste. L'impression de la lumière sur la rétine n'est pas un effet instantané, et de là vient que si l'on fait tourner rapidement dans l'air un charbon ardent, l'œil verra un cercle de feu qui paraîtra fixe pendant tout le temps du mouvement ; car alors l'impression faite, dès le premier instant, sur un point déterminé de l'organe, par la lumière que lance le charbon, persiste jusqn'à ce que le rayon revienne à l'endroit où il était quand cette impression a eu lieu ; et ainsi la sensation se renouvelle sans cesse avant d'avoir été détruite. D'après cette observation, Newton se proposa d'essayer si les différentes couleurs du spectre solaire ne pourraient pas agir sur l'œil, en se succédant avec tant de rapidité, qu'au moment de chaque impression, les traces des impressions précédentes n'étant pas encore effacées, le résultat fût le même que celui d'une sensation unique produite par une couleur blanche permanente (1).

Pour vérifier cette idée, Newton s'était pourvu d'un instrument qui avait la forme d'un peigne composé de seize dents, larges d'environ 40 millimètres, ou un pouce et demi,

(1) *Optice Lucis*, lib. I, pars 2, propos. 5, exper. 10.

et écartées l'une de l'autre à peu près de 54 millimètres, ou deux pouces. Ayant fait tomber sur une lentille les rayons qui avaient traversé un prisme, il disposa au-delà de cette lentille un papier, à une telle distance, que l'image du soleil y paraissait blanche, lorsque les rayons allaient librement du prisme à la lentille. Il plaça ensuite successivement les dents du peigne immédiatement avant la lentille, de manière à intercepter une partie des rayons colorés qui étaient sur le point d'y entrer, tandis que les autres rayons, que rien n'empêchait de la traverser, allaient peindre sur le papier l'image circulaire du soleil. Cette image alors perdait sa blancheur, et prenait toujours une couleur composée de toutes celles des rayons qui n'avaient pas été interceptés, et cette couleur variait continuellement avec la position du peigne. Mais lorsque Newton imprimait au peigne un mouvement assez rapide pour que la précipitation, avec laquelle les impressions des diverses couleurs se succédaient, ne laissât plus à l'œil le temps de les distinguer, on ne voyait plus ni rouge, ni jaune, ni vert, ni bleu, ni violet; mais le mélange confus de toutes les couleurs donnait naissance à une blancheur uniforme, dont cependant aucune partie n'était blanche; chaque couleur y conservait encore son existence à part. Or, lorsqu'ensuite on retirait le peigne, rien n'était changé dans la manière d'être de la lumière blanche que l'œil appercevait encore sur le papier; seulement toutes les couleurs, dans ce cas, agissaient à-la-fois sur l'organe, au lieu que quand on employait le peigne, elles agissaient successivement, mais à des intervalles de temps si petits, que le résultat équivalait à un concours d'actions simultanées.

Réfutation de l'Opinion qui ne suppose la Lumière composée que de trois Couleurs.

952. Dans l'image colorée produite par la réfraction du prisme, l'orangé se trouve placé entre le jaune et le rouge, et le vert entre le bleu et le jaune. Or, on sait qu'en mêlant

artificiellement du jaune avec du rouge, on obtient une couleur orangée, et si l'on mêle du jaune avec du bleu, on aura une couleur verte. Cette observation a fait penser à quelques physiciens que l'orangé et le vert produits par la réfraction de la lumière à travers le prisme, provenaient du mélange de deux couleurs voisines, et devaient être supprimés dans l'ordre des couleurs homogènes. Mais cette idée est visiblement démentie par l'expérience ; car si vous isolez les rayons verts de l'image, en interceptant les autres couleurs, et que vous fassiez passer ces rayons à travers un second, un troisième, un quatrième prisme, ils conserveront constamment leur couleur verte. Au contraire, si vous interceptez les rayons verts, rouges et violets, pour ne laisser subsister que le jaune et le bleu mêlés ensemble, au foyer d'une lentille, à l'aide du procédé que nous avons décrit précédemment (945), vous aurez d'abord une couleur verte ; mais faites passer cette couleur à travers un nouveau prisme, et à l'instant elle va se résoudre en ses couleurs composantes, de manière que le bleu et le vert se peindront séparément sur un carton placé au-delà du second prisme. Il est fâcheux pour l'opinion dont il s'agit, que le rouge soit si éloigné du violet, qui se trouve placé à côté du bleu ; car le violet se forme artificiellement par un mélange de rouge et de bleu ; et ainsi on peut composer en peinture une espèce d'imitation de l'image colorée donnée par l'expérience, en employant seulement trois couleurs, savoir, le rouge, le jaune et le bleu ; et effectivement, l'histoire nous apprend que les anciens peintres ont opéré, pendant long-temps, avec ces seules couleurs (1). Il est possible que cette faculté de faire beaucoup avec peu soit pour l'art une véritable richesse ; mais c'est appauvrir la nature, que de vouloir la resserrer dans les limites de nos moyens artificiels.

(1) Encyclopédie Méthod., première partie; Beaux Arts, t. I, p. 160.

Explication des Apparences que présentent les Objets vus à travers un Prisme.

953. Supposons que l'on regarde par l'intermède d'un prisme *abc* (*fig.* 120) un objet voisin, tel qu'un carton blanc d'une certaine étendue, situé verticalement, et d'une figure rectangulaire, qui ait deux de ses bords parallèles à l'axe du prisme; le choix de cette position et de cette figure n'a pour but que de ramener l'expérience à un cas simple; et ce que nous en dirons peut s'appliquer, proportion gardée, à tous les autres cas.

D'après ce que nous avons dit (933) de la réfraction des rayons à travers un prisme qui tourne sur son axe, on conçoit que, suivant les divers mouvemens que l'on fera faire au prisme, l'image du carton pourra être vue dans la position où elle devient stationnaire, ou se relever vers cette position, ou enfin s'abaisser en dessous. Or, dans chaque position, le bord supérieur présentera successivement, et en descendant, quatre bandes de diverses couleurs, dont la plus élevée sera le rouge pur, et les trois autres seront mélangées de rouge et d'orangé, d'orangé et de jaune, et de ces trois couleurs unies au vert. Le bord inférieur offrira quatre autres bandes qui, étant prises en remontant, donneront le violet pur, le violet mêlé d'indigo, puis ces deux couleurs unies au bleu, et enfin ces trois dernières couleurs unies au vert, et l'espace intermédiaire restera blanc.

954. Pour expliquer cet effet, nous observerons qu'il part de tous les différens points du carton des rayons de toutes les couleurs qui, après s'être réfractés en traversant le prisme, se dirigent vers l'œil sous la forme d'une espèce de pyramide, dont le sommet est dans la prunelle. Supposons qu'il n'existe que des rayons rouges, la surface entière du carton paraîtra teinte de cette même couleur; chacune des autres espèces de rayons, si elle existait seule, ferait voir de même la surface du carton sous la couleur particulière à cette espèce. Réunissons

maintenant toutes les couleurs ; on pourra considérer les images qu'elles tendent à produire chacune séparément, comme autant de rectangles de sept couleurs différentes, qui anticipent les uns sur les autres d'une certaine quantité, par leurs bords supérieurs ou inférieurs, à cause de la différence des réfractions. Dans cette espèce d'enjambement d'une couleur sur l'autre, le rouge sera un peu relevé au-dessus de l'orangé, celui-ci au-dessus du jaune, et ainsi de suite, de manière que, vers le bord opposé, le violet descendra au-dessous de l'indigo, celui-ci au-dessous du bleu, etc.

Il résulte de là que la partie supérieure du carton se terminera par une bande de rouge pur ; qu'en dessous de cette bande il y en aura une seconde mêlée de rouge et d'orangé, puis une troisième mêlée de rouge, d'orangé et de jaune, et une quatrième mêlée de rouge, d'orangé, de jaune et de vert. Si l'on reprend ensuite les couleurs de bas en haut, on conçoit que la partie inférieure doit être bordée d'une bande de violet pur, au-dessus de laquelle il s'en trouvera une seconde mêlée de violet et d'indigo, puis une troisième mêlée de violet, d'indigo et de bleu, et enfin une quatrième mêlée de violet, d'indigo, de bleu et de vert. Dans l'espace compris entre cette quatrième bande et celle qui tient le même rang parmi les bandes supérieures, toutes les couleurs se trouvant mélangées produiront le blanc.

Tout ceci suppose que le carton ait une certaine étendue, ainsi que nous l'avons dit ; moins sa hauteur sera considérable, et plus les couleurs se dégageront les unes des autres, vers son milieu, et approcheront de l'arrangement qui a lieu dans l'image colorée produite par la réfraction du prisme, au moyen de l'expérience ordinaire ; ensorte que la hauteur peut être assez petite pour que les différentes couleurs se succèdent, sans laisser aucun espace blanc intermédiaire.

De l'Arc-en-ciel.

955. La lumière qui embellit avec tant de magnificence un ciel pur et serein, par le spectacle des astres qui la répandent, devient aussi quelquefois, pour un ciel sombre et nébuleux, un ornement qui, par la pompe et la variété de ses riches couleurs, semble appeler les regards et l'attention de tous ceux qui sont à portée de le voir. Dans ce peu de mots, on reconnaît déjà l'arc-en-ciel. Nous savons que ce phénomène n'a jamais lieu que quand un nuage opposé au soleil luisant se résout en pluie, d'où il suit que le spectateur a toujours le dos tourné au soleil. Assez ordinairement on apperçoit deux arcs; l'un intérieur, dont les couleurs sont plus vives; l'autre extérieur et plus pâle : tous deux présentent la même suite de couleurs que l'image produite par le prisme, c'est-à-dire, le rouge, l'orangé, le jaune, le vert, le bleu, l'indigo et le violet; mais dans l'arc intérieur le rouge est le plus élevé, et dans l'arc extérieur c'est le violet. Ces deux arcs dépendent de la réfraction de la lumière combinée avec sa réflexion, et on ne les apperçoit que quand les rayons incidens font, avec les rayons emergens, un certain angle que nous indiquerons bientôt.

956. Antoine de Dominis paraît être le premier qui ait tenté, avec quelque succès, d'expliquer physiquement l'arc-en-ciel. Il l'imita à l'aide d'une expérience que nous ferons connaître, et détermina les différentes inflexions de la lumière dans les gouttes de pluie; mais cette détermination n'est point exacte, relativement à l'arc extérieur. Descartes la réforma et mit, en général, plus de précision dans la manière de tracer la marche des rayons. Enfin, Newton ayant repris cette explication, y ajouta le degré essentiel de perfection dont elle manquait, en analysant la distribution du coloris, qui est comme l'ame du phénomène : c'est d'après ses principes que nous allons la développer.

Rayons efficaces dans le cas de deux Réfractions et d'une seule Réflexion.

957. Soit *fzpq* (*fig.* 127, Pl. 8) la circonférence d'un grand cercle provenant d'une section faite dans un globe transparent d'une densité plus grande que celle de l'air. Ayant mené un diamètre quelconque *fp*, supposons qu'un faisceau *yf* de rayons incidens homogènes, d'abord situé sur la direction de *fp*, monte parallélement à lui-même le long du quart de cercle *fz* : ce faisceau étant parvenu, par exemple, en *ab*, se réfractera au point d'incidence suivant une direction telle que *bd*, puis se sondivisera en deux parties, dont l'une repassera dans l'air en s'y réfractant de nouveau, et l'autre échappera à la réfraction en se réfléchissant sur la concavité intérieure du cercle, suivant une direction *dt*, de manière que l'arc *dqt* sera égal à l'arc *dzb*. Cette même partie, en repassant à son tour dans l'air, s'y réfractera suivant une direction *tm* qui fera, avec la perpendiculaire au point *t*, un angle égal à l'angle d'incidence du faisceau *ab*.

Prolongeons les lignes *ab*, *mt* jusqu'à ce qu'elles se rencontrent en *x*. L'angle *axm* sera celui que fait le rayon incident avec le rayon émergent. Or, le calcnl fait voir que pendant le monvement du rayon incident le long du quart de cercle *fhz*, l'angle *axm* augmente jusqu'à une certaine limite, passé laquelle il décroît.

Pour concevoir que cela doit être, il faut observer que la valeur de l'angle *axm* est double de l'arc *dp* (1). Or, à mesure que *ab* monte le long de *fhz*, *dp* lui-même va en augmentant jusqu'à un certain terme, passé lequel il diminue. C'est ce qu'on appercevra, en faisant attention que l'angle d'incidence croissant toujours à mesure que *yf* s'élève, si l'on prend

(1) Ayant mené *xl* qui passe par le centre, et qui parconséquent coupera en deux également l'arc *bt*, on aura pour la mesure de axm, $\frac{1}{2}(bt-go) = lf+fl-dg = gp+dp-dg = dg+dp+dp-dg = 2dp$.

deux rayons incidens, tels que *eh*, *ab*, le rayon rompu *hr*, qui appartient au premier, s'inclinera nécessairement vers *bd*, qui est le rayon rompu relatif au second. Or, tant que la partie du quart de cercle *fhz* que rencontrent les rayons incidens, est peu inclinée sur le diamètre *fp*, le rayon *hr* est tout entier au-dessus du rayon *bd*, meme en supposant l'arc *bh* extremement petit; mais à mesure que l'arc devient plus oblique, le rayon *hr* s'incline davantage vers *bd*, ensorte qu'il y a un terme où les extrémités des rayons rompus se confondent en un point commun *d* (*fig.* 128); et au-delà de ce terme, l'obliquité de l'arc augmentant toujours, les deux rayons rompus, tels que *hd*, *su*, qui appartiennent aux rayons incidens *eh*, *ns*, se croisent; d'où l'on voit que *dp* (*fig.* 127) va en augmentant jusqu'au terme où les poins *r*, *d* deviennent contigus, et diminue ensuite depuis ce même terme, auquel répond le *maximum* de l'angle *axm* (1).

958. Rappelons-nous maintenant l'observation déjà faite précédemment (929), que les variations d'une quantité qui approche de sa limite, ou qui commence seulement à s'en écarter, sont presque insensibles. Nous en conclurons que dans le voisinage du point *d*, où les quantités dont les rayons rompus s'inclinent les uns sur les autres augmentent presque infiniment peu, la densité de la lumière réfractée et celle de la lumière réfléchie sur la concavité du cercle sont beaucoup plus grandes que partout ailleurs; d'où il suit que les rayons émergens provenus de cette même lumière, tels que *tm*, *ik*, etc. (*fig.* 128), seront eux-mêmes beaucoup plus abondans sur un petit espace donné.

D'une autre part, tous ces rayons émergens seront sensi-

(1) Plus la partie de l'arc que rencontrent les rayons incidens est oblique, plus la difference augmente entre les incidences aux deux extrémités d'un même arc *bh*, *hs*, etc. (*fig.* 128), ces arcs étant supposés égaux. De plus, il est visible que les rayons *eh*, *ns* sont plus rapprochés que les rayons *ab*, *eh*. Or, ces deux causes tendent à augmenter l'inclinaison respective des deux rayons réfractés, et cette augmentation devient telle à la fin, que les rayons se croisent.

blement parallèles entre eux, à cause du concours des rayons rompus dans un même point. Donc si l'on suppose qu'il tombe en même temps des rayons sur tous les points du quart de cercle *fhz*, et qu'il y ait un spectateur dont l'œil soit situé au point *o*, pris sur une ligne qui passe entre *mt* et *ki*, cet œil recevra beaucoup plus de rayons que s'il était placé partout ailleurs, tant parceque ceux sur la direction desquels il se trouve sont beaucoup plus ramassés, que parcequ'étant parallèles, ils entreront en plus grand nombre dans la prunelle, que si l'œil n'était à portée que de ceux qui sortent en divergeant par les autres points compris entre *f* et *q*.

959. On a donné à ces rayons qui s'accumulent, en quelque sorte, dans le voisinage de la limite, le nom de *rayons efficaces*, parcequ'ils sont les seuls dont l'impression soit bien sensible. On peut les assimiler à ceux qu'un miroir concave ou une lentille rassemblent dans un foyer commun où leur activité se concentre.

Rayons efficaces dans le cas de deux Réfractions et de deux Réflexions.

960. Les rayons qui se réfléchissent du point *d* au point *t*, ne repassent pas tous dans l'air; mais une partie se réfléchit de nouveau sur la concavité du cercle, ensorte que la lumière subit successivement deux, trois, quatre, etc. réflexions, à chacune desquelles il y a un certain nombre de rayons qui rentrent dans l'air environnant. Nous nous bornerons ici à considérer l'effet produit par deux réflexions.

961. Concevons donc de nouveau qu'un faisceau *qi* (*fig.* 129) de lumière homogène, dont la direction coincide avec le diamètre *ie*, monte parallélement à lui-même le long du quart de cercle *inv*, et que dans chacune de ses positions, telle que *ab*, une partie des rayons rompus qui ont parcouru *bd*, après s'etre réfléchis de *d* en *g*, puis de *g* en *t*, rentrent dans l'air, suivant la direction *tr*, qui croise au point *z* le rayon incident *ab*. On

démontre que, dans cette hypothèse, l'angle *azr* décroît jusqu'à un certain terme, passé lequel il augmente.

Pour donner une idée de cette variation, qui est l'inverse de celle que nous avons vu avoir lieu, dans le cas d'une seule réflexion, menons les prolongemens *bu*, *ty*, des rayons *ab*, *rt*, puis la ligne *zl* qui passe par le centre *c*, et coupe en deux moitiés l'angle *bzt* égal à *azr*. On prouve, d'une manière très-simple, que la mesure de cet angle est double de l'arc *is* (1). Or pendant le mouvement du rayon incident, le long de *inv*, l'arc *is* lui-même diminue d'abord et ensuite commence à augmenter. Car l'angle d'incidence devenant toujours plus grand, à mesure que le rayon s'élève, si l'on prend deux de ces rayons, tels que *ab*, *mn*, on concevra, en appliquant ici le raisonnement que nous avons fait plus haut (957), que le rayon rompu *no*, qui appartient au rayon incident *mn*, doit s'incliner de plus en plus vers *bd*, qui est le rayon rompu relatif à *ab*, de manière qu'à un certain terme, le point *o* se confond avec le point *d*, et qu'ensuite les deux rayons se croisent. Or en premier lieu, dans toutes les positions antérieures à ce croisement, l'arc *is* diminue. Pour le prouver, remarquons que les trois rayons *bd*, *dg*, *gt* étant égaux, la ligne *zl* qui coupe en deux l'angle *bzt*, passe par le milieu *k* du rayon *dg* qui provient de la première réflexion. Maintenant si nous considérons l'autre rayon incident *mn*, il est aisé de voir que le rayon rompu *no* qui lui appartient sera plus petit que *bd*, et ainsi le rayon réfléchi *of* sera aussi plus court que son analogue *dg*. Or, par une suite de cette différence et de la position respective des deux rayons, le milieu *k'* du rayon *of* est plus élevé que le milieu *k* du rayon *dg*, d'où il résulte que le diamètre *l'k'cs'*, qui étant prolongé diviserait en deux l'angle formé par le rayon incident *mn* avec son rayon émergent, a son extrémité *s'* située entre les points *s*, *i*. Donc l'arc *is* a subi une diminution.

(1) Cette mesure est $\frac{1}{2}(yx - bt) = ex + el - bs = bs + is + is - bs = 2is$.

Si

Si l'on suppose que le rayon incident étant encore plus élevé, le rayon *no* parvienne à couper le rayon *bd*, on concevra avec un peu d'attention, que le rayon *of* se trouvant alors tout entier au-delà du rayon *dg*, approchera du parallélisme avec celui-ci; en même temps l'angle analogue à *azr* continuera de décroître, mais toujours plus lentement, et lorsque *of* sera devenu parallèle à *dg*, comme on le voit (*fig.* 130), les points *k* et *k'* se trouveront sur un même diamètre, et l'angle *azr* aura atteint son *minimum*. Effectivement si l'on imagine que le rayon incident continue de monter, le rayon *no* s'abaissant toujours davantage en dessous du rayon *bd*, par sa partie située vers *o*, le rayon *of* convergera avec *dg*, et le point *k'* commencera à descendre en dessous du point *k*, d'où il suit que le diamètre *l'k'cs'* (*fig.* 129) aura son extrémité *s'* située en dessus du point *s*, et ainsi l'arc *is* se trouvera augmenté.

962. Dans le cas du *minimum*, où le rayon *of* (*fig.* 130) est devenu parallèle à *dg*, le rayon émergent *tr* est aussi parallèle au rayon émergent *ph*. Maintenant, pour ramener la marche des rayons à celle qui a lieu par rapport à l'arc en ciel, il faut supposer (ce qui revient au même), que *rt* et *hp* fassent la fonction de rayons incidens, et que *ba* et *nm* soient les rayons émergens correspondans; et en appliquant ici ce que nous avons dit (958) des rayons qui ne subissent qu'une seule réflexion, on en conclura qu'un œil placé sur la direction d'une ligne menée entre *nm* et *ba*, doit recevoir beaucoup plus de rayons que dans toute autre position, c'est-à-dire, qu'il sera à portée des rayons efficaces.

Valeurs des Angles qui déterminent les Effets des Rayons Efficaces.

963. Si l'on suppose que le passage de la lumière incidente se fasse de l'air dans l'eau, le *maximum* de l'angle *axm* (*fig.* 127) aura lieu pour les rayons rouges, lorsque cet angle sera de $42^d.\ 2'$; et pour les rayons violets, lorsqu'il sera de $40^d.\ 17'$. Dans le même cas, l'arc *bf* qui mesure l'angle d'incidence

du rayon *ab*, à cause du parallélisme entre *ab* et le diamètre *fp*, est de $59^{d}\cdot 24'$, pour les rayons rouges, et de $58^{d}\cdot 41'$ pour les violets.

D'une autre part, le *minimum* de l'angle *mzh* (*fig.* 130), relativement aux rayons rouges, est de $50^{d}\cdot 57'$, et relativement aux rayons violets, de $54^{d}\cdot 7'$; l'angle d'incidence du rayon *hp* est alors de $71^{d}\cdot 50'$, pour les rayons rouges, et de $71^{d}\cdot 26'$ pour les violets.

Application des Principes précédens aux Phénomènes de l'Arc-en-ciel.

964. Concevons un spectateur dont l'œil soit placé en O (*fig.* 131, Pl. 9), et quatre globules d'eau *df*, *ac*, *kr*, *gl*, tellement situés que les rayons solaires *Sd*, *Sa*, *Sr*, *Sl*, après deux réfractions et une réflexion dans les globules inférieurs, ou après deux réfractions et deux réflexions dans les globules supérieurs, fassent avec les rayons émergens des angles égaux à ceux que nous venons de citer, savoir, OxS de $40^{d}\cdot 17'$, OzS de $42^{d}\cdot 2'$, OyS de $50^{d}\cdot 57'$, et OuS de $54^{d}\cdot 7'$: on suppose ici que les rayons partent du centre du soleil; et comme la distance qu'ils parcourent est presque infinie relativement à celle qui sépare les globules d'eau, ils sont censés parallèles entre eux.

Or il est clair, d'après ce que nous avons dit précédemment (963), que l'angle OzS de $42^{d}\cdot 2'$ étant celui que font entre eux les rayons rouges incidens et émergens, dans le cas où ces rayons sont le plus condensés, l'œil appercevra le rouge le plus vif dans le globule *ac*, ainsi que dans tous les autres situés semblablement sur la direction *Oc*. D'une autre part, l'angle OxS étant celui qui se rapporte aux rayons violets efficaces, l'observateur verra le violet le plus intense dans le globule *df*, et dans tous ceux qui seront sur la direction *Of*; de plus, il ne verra que le rouge dans les premiers globules, et que le violet dans les seconds; car les rayons orangés, par exemple, dont la réfraction est plus grande que celle des rayons rouges, doivent, pour être efficaces, se réfracter, de

manière que l'angle formé par les incidens avec les émergens soit moindre que $42^{d}\cdot 2'$, et plus grand que $40^{d}\cdot 17'$; et puisque l'angle dont il s'agit est le plus grand parmi tous ceux que peuvent faire les mêmes rayons, cet angle ne peut avoir lieu à l'égard du globule *ac* ou du globule *df*, mais il existera dans quelqu'un des globules intermédiaires. Il suit de là que les couleurs comprises entre le rouge et le violet, ainsi que les nuances de ces couleurs, seront vues successivement dans les globules situés entre *ac* et *df*, suivant l'ordre prescrit par leurs divers degrés de réfrangibilité ; ensorte que la succession de toutes les couleurs, prise en descendant, sera celle-ci : rouge, orangé, jaune, vert, bleu, indigo, violet; mais le violet étant melé avec la couleur blanchâtre des nuages adjacens, se trouvera affaibli par ce mélange, et tirera sur la couleur pourprée.

965. Soit maintenant OP une droite parallèle aux rayons solaires, et que l'on appelle l'axe de la vision. Concevons que les rayons O*x*, O*z*, et tous les autres qui appartiennent aux globules intermédiaires, restant fixes par leur point commun O, tournent autour de OP en continuant de faire le meme angle avec cette ligne : ces rayons décriront une bande curviligne CD*f*EG*a* qui se terminera à l'horizon, et tous les globules situés dans les limites de cette bande, ainsi que ceux qui se trouvent sur les surfaces coniques décrites par le mouvement des rayons O*x*, O*z*, etc., feront voir à l'œil des couleurs qui s'étendront circulairement sur toute la surface CD*f*EG*a*, dans le même ordre que celui des couleurs comprises depuis *a* jusqu'en *f*: telle est la manière dont se forme l'arc intérieur.

966. En appliquant le même raisonnement à l'arc extérieur, on concevra que l'angle O*u*S de $54^{d}\cdot 7'$ étant celui que font entre eux les rayons violets incidens et émergens, qui agissent le plus efficacement, l'observateur verra le violet foncé dans le globule *gl*. De plus, l'angle OyS de $50^{d}\cdot 57'$ faisant la meme fonction à l'égard des rayons rouges, l'observateur appercevra le rouge le plus vif dans le globule *kr* : les autres couleurs s'offriront successivement avec toutes leurs nuances dans les globules intermédiaires, et s'étendront, ainsi que le violet et le

rouge, sur la surface d'une bande curviligne AB*m*HN*g*, qui formera l'arc extérieur. Mais toutes ces couleurs se présenteront dans un ordre renversé, par rapport à celles de l'arc intérieur; ensorte qu'en allant de haut en bas, leur succession sera celle-ci: violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge. D'ailleurs elles seront beaucoup plus faibles, parceque les rayons qui les produisent subissent deux réflexions, à chacune desquelles il y en a toujours une partie qui repassent dans l'air.

Largeurs des deux Arcs.

967. La largeur apparente de l'arc intérieur, d'après les principes qui viennent d'être exposés, est de $1^{d.}$ 45′, différence entre les angles O*x*S, O*z*S; celle de l'arc extérieur est de $3^{d.}$ 10′, différence entre les angles O*y*S, O*u*S; et la distance entre les deux arcs est de $8^{d.}$ 55′, différence entre les angles O*y*S, O*z*S.

968. Telles seraient effectivement les dimensions des deux arcs, si le soleil n'était qu'un point, ou s'il n'envoyait vers les gouttes de pluie que des rayons partis de son centre; mais il en vient également de tous les points de son disque, ce qui augmente un peu la largeur de l'un et l'autre arc.

Pour concevoir la manière dont cette augmentation a lieu, observons que le diamètre du soleil, vu à la distance immense où nous sommes de cet astre, sous-tend un angle d'environ 30 minutes (934). Or, si nous nous bornons à considérer les deux rayons qui partent des extrémités du diamètre pris dans le sens vertical, il est facile de juger que l'effet du rayon supérieur est le même à l'égard de celui du rayon central, que si le soleil, après avoir produit les deux arcs en vertu de ce seul rayon, se trouvait tout d'un coup relevé d'un quart de degré au-dessus de l'horizon, et que pour avoir pareillement l'effet du rayon inférieur, il suffit de supposer que le soleil s'abaisse d'un quart de degré vers l'horizon.

969. Cela posé, soit *s′s″* (*fig.* 132) le diamètre vertical du soleil, et *sz* le rayon qui donne le rouge de l'arc intérieur, par

l'intermède du globule *ac*, comme nous l'avons expliqué précédemment; soit toujours *o* la position de l'œil, et *oz* le rayon émergent. Concevons que le point *s* soit transporté en *s'*, et qu'un rayon parti de *s'* prenne une direction telle que *s'gz'*, qui croise dans quelque point *g* celle du rayon *sz*. Ayant mené *og*, décrivons une circonférence de cercle qui passe par les points *z*, *o*, *g*, et du point *o* menons la ligne *oz'* qui rencontre *sz'* à l'endroit où celle-ci coupe la circonférence. L'angle *gz'o* sera évidemment égal à l'angle *gzo*, c'est-à-dire qu'il sera de $42^{d}\cdot 2'$, et en même temps l'angle *zgz'* sera d'un quart de degré, comme l'angle *s'gs* qui mesure le demi-diamètre du soleil. Donc la position du rayon *s'z'* est celle qui satisfait à la condition requise, pour que l'œil voie de nouveau le rouge dans le globule *a'c'* placé au-dessus du globule *ac*.

Les rayons qui appartiennent aux autres couleurs, et qui sont censés partir aussi du point *s'*, feront voir ces mêmes couleurs dans d'autres globules inférieurs au globule *az*, ensorte qu'il se formera un second arc dont tous les points se releveront de 15′ au-dessus de ceux qui leur correspondent dans l'arc produit par les rayons émanés du point *s*, ce qui fera croître de 15′ la largeur de ce dernier arc, vers son bord supérieur.

En faisant le même raisonnement par rapport au point *s''*, on en conclura qu'un rayon *s''z''* qui croise le rayon *sz* au point *g* fera aussi un angle de $42^{d}\cdot 2'$ avec le rayon *oz''* mené de l'œil au point où *s''z''* rencontre la circonférence, d'où il résulte que l'œil verra encore le rouge dans un globule *a''c''* situé au-dessous du globule *az*; et comme toutes les autres couleurs reparaîtront de même dans des globules inférieurs, l'ensemble des rayons partis de *s''* donnera naissance à un troisième arc, dont tous les points s'abaisseront de 15′ en dessous des points analogues de l'arc formé par les rayons émanés de *s*, ce qui fera croître de 15′ la largeur de cet arc vers son bord inférieur. Ainsi la largeur totale surpassera de 30′ celle qui avait lieu en vertu de la seule réfraction du rayon *sz*, de manière qu'elle sera $2^{d}\cdot 15'$.

Par une suite nécessaire, la largeur de l'arc extérieur recevra les memes accroissemens, et sera en totalité de $3^d.\ 40'$, et la distance entre les deux arcs se trouvant diminuée de $30'$, ne sera plus que de $8^d.\ 25'$. Newton a vérifié ces dimensions par des observations directes (1).

Circonstances qui font varier la partie visible de l'Arc-en-ciel.

970. On voit une partie plus ou moins grande de l'arc-en-ciel, suivant que le soleil est plus ou moins élevé au-dessus de l'horizon. Lorsque cet astre est près du plan même de l'horizon, l'axe OP (*fig.* 131) de la vision, qui est en même temps celui du cône formé par tous les rayons efficaces, coincide aussi avec l'horizon, ou à peu près, et dans ce cas l'arc-en-ciel paraît sous la figure d'un demi-cercle. A mesure que le soleil s'élève, l'axe OP s'abaisse de la même quantité en dessous de sa première position, et l'arc va en diminuant. Enfin, lorsque le soleil est à $42^d.$ au-dessus de l'horizon, l'axe se trouvant abaissé en dessous de ce cercle du même nombre de degrés, le sommet de l'arc-en-ciel touche l'horizon; d'où il suit que si le soleil s'élève davantage, l'arc intérieur disparaîtra; il ne restera plus qu'une portion de l'arc extérieur, qui ne cessera d'etre visible que quand la hauteur du soleil sera de $54^d.$

971. Si l'on se trouve sur une éminence, lorsque le soleil est à l'horizon, ou même au-dessous, l'axe OP se relèvera en dessus du même horizon, et ainsi l'arc surpassera un demi-cercle; et si le lieu étant très-élevé, le nuage est à une petite distance de l'observateur, il pourra arriver que celui-ci voie le cercle entier (2).

---

(1) *Optice Lucis*, lib I, pars 2, propos. 9, probl. 4.

(2) Smith, Traité d'Optique; 1767, p. 587.

Soit NH (*fig.* 133) l'horizon, S le soleil un peu élevé au-dessus de ce cercle, O l'œil du spectateur, C un globule de pluie dans lequel cet œil apper-

Cas où l'on voit plus de deux Arcs-en-ciel.

972. Nous avons dit (960) que les rayons qui sont entrés dans chaque goutte de pluie subissent des réflexions continuelles, en vertu desquelles ils décrivent une espèce de polygone qui se replie sur lui-même ; mais à chaque contact des rayons avec la concavité du globule, une partie échappe à la réflexion pour repasser dans l'air, ensorte que le nombre de ceux qui continuent de se réfléchir d'un point à l'autre de la même concavité, va toujours en diminuant. On peut donc supposer des rayons incidens, dont telle soit la position relativement à l'arc qu'ils rencontrent, qu'après trois réflexions ceux d'une couleur déterminée qui rentreront dans l'air étant dans le cas des rayons efficaces (958), se dirigent vers l'œil ; et ainsi, il se formera un troisième arc-en-ciel plus élevé que le second ; mais les couleurs, dans ce cas, sont tellement affaiblies par les pertes qu'elles ont faites à chacune des trois réflexions, qu'il est rare que l'on puisse distinguer ce troisième arc, à moins que le ciel ne soit très-sombre dans la partie située en face du spectateur, et que le soleil n'éclaire fortement la partie opposée (1). On conçoit de même la possi-

---

çoit le rouge : les lignes OC, OP étant presque infiniment petites par rapport à la distance du soleil à la terre, on conçoit comment l'angle COP peut être de $42^{d.}\ 2'$, malgré la petite élévation du soleil, et comment, par une suite nécessaire, l'axe OP de la vision doit coïncider à peu près avec l'horizon ; et ainsi l'arc-en-ciel sera un demi-cercle.

Si le soleil S (*fig.* 134) est élevé de $42^{d.}\ 2'$ au-dessus de l'horizon, alors l'angle SCO d'une part, et l'angle COP de l'autre étant aussi chacun de $42^{d.}\ 2'$, OC coïncidera avec l'horizon, et parconséquent l'arc-en-ciel intérieur touchera seulement l'horizon, et sera tout entier en dessous. Enfin, si le soleil étant à l'horizon ou au-dessous, le spectateur est sur une haute montagne, et que le nuage soit peu éloigné, l'axe OP (*fig.* 133) pourra se relever tellement que la ligne CP, prolongée inférieurement d'une quantité égale à elle-même, aboutisse à l'horizon ; et dans ce cas, le cercle entier sera visible pour le spectateur.

(1) Musschenbroek ; Essai de Physique, t. II, p. 793.

bilité qu'il se forme un quatrième arc-en-ciel, par des rayons qui subiront quatre réflexions et deux réfractions, et ainsi de suite ; mais tous ces arcs ne peuvent être apperçus qu'à travers la théorie.

973. On remarque aussi quelquefois au-dessous du premier arc-en-ciel, d'autres arcs qui présentent rarement l'ensemble des couleurs propres à ce phénomène ; le plus communément, il n'y en a qu'une ou deux qui soient visibles. Pemberton attribue ces arcs secondaires à des rayons qui se dispersent, en s'écartant néanmoins assez peu de ceux qui produisent l'arc-en-ciel ordinaire, pour que l'œil se trouve sur leur direction. Parmi les couleurs qui proviennent de ces rayons, les unes se perdent dans la partie violette du premier arc, et les autres sont vues distinctement dans l'espace situé au-dessous (1).

974. L'expérience par laquelle Antoine de Dominis avait représenté le phénomène de l'arc-en-ciel, consistait à suspendre une boule de verre remplie d'eau dans un endroit exposé au soleil, et à la faire monter et descendre de manière que les angles formés par les rayons incidens et émergens variassent depuis $42^{d.}$ jusqu'à $51^{d.}$ environ. On voyait successivement les couleurs des deux arcs se peindre dans la boule, suivant l'ordre où elles se présentent dans les globules de la pluie.

975. D'après l'explication que nous venons de donner de l'arc-en-ciel, il est facile d'y ramener plusieurs effets qui sont comme autant de copies de ce magnifique tableau ; on parvient à l'imiter artificiellement, en jetant de l'eau en l'air de manière qu'elle s'éparpille, et en tournant le dos au soleil. On apperçoit souvent ses couleurs dans la cime d'un jet d'eau ; quelquefois il se peint sur l'herbe d'une prairie humectée par la rosée, et mêle ses diverses teintes à celles des fleurs qui embellissent la verdure.

---

(1) Pemberton ; Elémens de Philos. Newtonn., traduct. franç. ; Amsterdam, 1795, p. 488 et suiv.

Des Couleurs considérées dans les Corps.

976. Nous avons fait voir, d'après la théorie de Newton, en quoi consistent les couleurs considérées dans la lumière, et nous avons reconnu la cause des impressions variées que produisent sur nos yeux ce que nous appelons le *rouge*, le *jaune*, le *vert*, etc., dans les différentes qualités inhérentes aux rayons, et indiquées par les divers degrés de réfrangibilité dont ils sont susceptibles. Nous avons maintenant à considérer les couleurs dans les corps dont elles accompagnent les images. La diversité de ces couleurs provient en général de la disposition particulière de chaque corps pour réfléchir la lumière. Lorsque cette disposition est telle que le corps réfléchit les rayons de toute espèce, dans l'état de mélange où ils arrivent à lui, ce corps nous paraît blanc, et ainsi, à proprement parler, la blancheur n'est point une couleur particulière; elle est l'assemblage de toutes les couleurs.

Si le corps est disposé de manière à réfléchir telle espèce particulière de rayons plus abondamment que les autres, en absorbant tout le reste, il paraîtra de la couleur relative à ces mêmes rayons. Ainsi, les corps rouges, bleus, verts, etc., sont ceux qui réfléchissent une grande quantité de rayons rouges, ou bleus, ou verts, etc., et qui éteignent les autres espèces de rayons.

977. Un grand nombre de corps sont propres en même temps à la réflexion de plusieurs espèces de rayons, et, par une suite nécessaire, présentent des couleurs mixtes. Il peut même arriver que de deux corps qui auraient, par exemple, la couleur verte, l'un réfléchisse le vert pur de la lumière, et l'autre le mélange du jaune et du bleu, d'où résultera la même couleur. Ce triage, qui varie à l'infini, donne lieu aux différentes espèces de rayons de se réunir de toutes les manières et dans toutes les proportions; et de là cette diversité inépuisable de nuances que la nature a répandues, comme en se jouant, sur la surface des différens corps.

978. Lorsqu'un corps absorbe presque toute la lumière qui arrive à lui, ce corps paraît noir ; il envoie à l'œil si peu de rayons réfléchis, qu'il n'est presque pas visible par lui-même, et sa présence, ainsi que sa figure, ne font impression sur nous qu'en ce qu'il interrompt, en quelque sorte, l'éclat de l'espace environnant.

Mais pour qu'un corps réfléchisse plutôt telle espèce de rayons que telle autre, il faut qu'il y ait en lui quelque chose qui détermine cette préférence : en quoi donc le corps rouge diffère-t-il, à cet égard, du corps jaune, ou vert, ou violet? On a essayé de répondre à ces questions d'après différentes hypothèses. Newton qui, de son côté, s'est beaucoup occupé de ce sujet intéressant, a continué d'interroger ici la nature avec le même succès, à l'aide d'une très-belle suite d'expériences dont nous allons faire connaître les résultats (1).

Phénomène des Anneaux colorés.

979. Ayant pris deux objectifs de télescope, l'un plan convexe, l'autre légérement convexe des deux côtés, Newton posa l'une des faces de celui-ci sur la surface plane du premier, et pressa d'abord légérement les deux verres, et ensuite de plus en plus, l'un contre l'autre. L'effet de cette pression graduée fut de faire paraître, dans la lame d'air comprise entre les deux verres, différens cercles colorés, qui avaient le point de contact pour centre commun, et dont le nombre augmentait en même temps que la pression des verres, de manière que celui qui avait paru le dernier environnait toujours le point de contact ; et que ce même cercle, sous un nouveau degré de pression, étendait sa circonférence en même temps que sa surface s'évidait, pour former une espèce d'anneau autour d'un nouveau cercle qui naissait vers son milieu.

La pression ayant été poussée jusqu'à un certain terme, Newton s'arrêta, et voici ce que l'observation lui offrit. Il y

(1) *Optice Lucis*, lib. II, pars 1, observ. 4, 5, 6, etc.

avait au point de contact une tache noire, qui était environnée de plusieurs séries de couleurs. Voici l'ordre que gardaient ces couleurs, en allant du centre vers les bords des deux verres : dans la première série, bleu, blanc, jaune et rouge ; dans la seconde, violet, bleu, vert, jaune et rouge ; dans la troisième, pourpre, bleu, vert, jaune et rouge ; dans la quatrième, vert et rouge ; dans la cinquième, bleu-verdâtre, rouge ; dans la sixième, bleu-verdâtre, rouge pâle ; dans la septième, bleu-verdâtre, blanc-rougeâtre. Au-delà de ces séries, dont les teintes allaient toujours en s'affaiblissant, la couleur retombait dans le blanc.

980. Newton mesura les diamètres des bandes annulaires, formées de ces différentes séries, en prenant les endroits où elles avaient le plus d'éclat, et il trouva que les carrés de ces diamètres étaient entre eux comme les termes de la progression 1, 3, 5, 7, 9, 11, etc., d'où il résulte que les intervalles entre les deux verres, aux endroits correspondans, suivaient la même progression (1).

D'après ces rapports, il suffisait de connaître la longueur absolue d'un seul diamètre, pour avoir les longueurs de tous les autres, ainsi que les épaisseurs de la lame d'air aux endroits où l'on voyait les différentes couleurs. Newton dressa une table de ces épaisseurs, par laquelle on voit que le bleu le plus intense, par exemple celui de la première série, est donné par une épaisseur de $0^{pouc.},000024$, en supposant le rayon visuel à peu-près perpendiculaire sur les deux objectifs.

981. Newton ayant aussi mesuré les diamètres des anneaux aux endroits intermédiaires où les couleurs s'obscurcissaient,

(1) Soit *nam* (*fig* 135) un diamètre pris sur la surface du verre plan, et *agf* une coupe de la sphère à laquelle appartient la partie de l'objectif biconvexe tournée vers *an*. Soient de plus *ab*, *ad*, les demi-diamètres de deux anneaux aux endroits où les couleurs sont les plus vives. Ayant mené *be*, *dg* parallèles au diamètre *af*, et *eh*, *gi* parallèles à *an*, on aura, par la propriété du cercle, $(eh)^2 : (gi)^2 :: ah \times hf : ai \times if :: ah \times af : ai \times af :: ah : ai :: be : dg$, les lignes *hf*, *if* étant censées égales au diamètre *af*, à cause que *ah*, *ai*, qui mesurent les intervalles *be*, *dg* entre les verres, sont censées être presque infiniment petites à l'égard du diamètre.

trouva que leurs carrés étaient entre eux comme les nombres pairs 2, 4, 6, 8, 10, 12, etc., et ainsi les intervalles entre les verres, aux endroits correspondans, suivaient une semblable progression.

982. Les diamètres des anneaux augmentaient ou diminuaient, suivant que le rayon visuel était plus ou moins incliné à la surface des deux verres, desorte que la plus grande contraction avait lieu lorsque l'œil était situé perpendiculairement au-dessus des verres. Du reste, les diamètres conservaient entre eux les mêmes rapports.

983. Tels étaient les phénomènes que présentaient les verres vus par réflexion ; mais lorsqu'on regardait au travers, pour observer l'effet de la lumière réfractée, de nouvelles séries de couleurs remplaçaient les précédentes. La tache centrale devenait blanche, et l'ordre des couleurs, relativement aux différentes séries, était celui-ci : dans la première, rouge-jaunâtre, noir, violet, bleu ; dans la seconde, blanc, jaune, rouge, violet, bleu ; dans la troisième, vert, jaune, rouge, vert-bleuâtre ; dans la quatrième, rouge, vert-bleuâtre ; dans la cinquième et dans la sixième, les deux mêmes couleurs. En comparant ces couleurs vues par réfraction, avec celles qui provenaient de la réflexion, on remarquait que le blanc répondait au noir, le rouge au bleu, le jaune au violet, le vert à un mélange de rouge et de violet, c'est-à-dire, que la même partie qui paraissait noire à la vue simple, devenait blanche lorsqu'on regardait à travers les objectifs, et ainsi des autres couleurs. Mais les teintes produites par la lumière réfractée étaient faibles et languissantes, à moins que le rayon visuel ne fût très-oblique ; dans ce cas, elles prenaient assez d'éclat et de vivacité.

984. Newton substitua l'eau à l'air entre les deux objectifs ; à l'instant les couleurs s'affaiblirent, et les anneaux se contractèrent, c'est-à-dire, que celui de telle couleur déterminée avait sa circonférence plus près du centre, que quand cette couleur était réfléchie par la lame d'air (1). Les diamètres de

(1) *Optice Lucis*, lib. II, pars 1, observ. 1a.

ces anneaux correspondans étaient entre eux à peu près comme 7 est à 8, et parconséquent le rapport de leurs carrés était celui de 49 à 64; d'où il suit que les épaisseurs des fluides, aux endroits où paraissaient les anneaux, étaient environ comme 3 à 4, c'est-à-dire, dans le rapport du sinus d'incidence à celui de réfraction, lorsque la lumière passe de l'eau dans l'air. Newton pense que ce résultat pourrait être étendu à toutes les espèces de milieux, ensorte que l'on en déduirait cette règle générale : lorsqu'un milieu plus ou moins dense que l'eau est resserré entre deux verres, l'intervalle entre ces verres, à l'endroit où l'on apperçoit telle couleur, est à l'intervalle qui donne la même couleur, au moyen de l'air, dans le rapport des sinus qui mesurent la réfraction, au passage du même milieu dans l'air. Cette règle pourra également s'appliquer à une lame mince détachée d'un corps quelconque, dont on voudrait déterminer l'épaisseur d'après le ton de sa couleur. Nous donnerons bientôt un exemple de la marche qui doit être suivie dans ces sortes de déterminations.

985. Newton varia l'expérience de plusieurs autres manières; il fixa son attention sur les couleurs des bulles qui se produisent dans nne eau savonneuse, dilatée par l'air qu'on y introduit en soufflant dans un tube (1). Il observa les changemens qu'elles subissaient, à mesure que la pellicule aqueuse, dont chaque bulle était formée, s'amincissait par l'écoulement de l'eau qui descendait de sa partie supérieure; il vit aussi les anneaux composés de ces couleurs se dilater, en s'écartant du sommet de la bulle, lorsqu'il les regardait plus obliquement; mais cette dilatation était beaucoup moindre, toutes choses égales d'ailleurs, que quand les couleurs étaient réfléchies par l'air. Il conclut de cette observation et de plusieurs autres, que quand la substance colorée avait une densité incomparablement plus grande que celle du milieu environnant, le changement d'obliquité dans la direction du rayon visuel n'en apportait aucun qui fût sensible dans la position des couleurs; ensorte que chaque partie,

(1) *Optice Lucis*, lib. II, pars 1, observ. 17.

vue sous tous les degrés d'inclinaison, conservait constamment sa couleur.

Anneaux produits par des Couleurs solitaires.

986. Dans toutes les expériences que nous venons de citer, les séries de couleurs, produites par la réflexion ou par la réfraction, différaient plus ou moins entre elles, soit par le nombre, soit par la combinaison des teintes. Newton, à l'aide d'une nouvelle expérience, parvint à démêler les différentes couleurs homogènes pour concourir vers l'effet total, et à faire, en quelque sorte, l'analyse du phénomène.

Ayant fait l'obscurité dans la chambre destinée à ses expériences, il se servit d'un prisme à travers lequel passait un rayon de lumière qui projetait le spectre solaire sur un papier blanc. La lame d'air comprise entre les deux verres réfléchissait, comme un miroir, les rayons renvoyés par ce papier (1). Newton tenant alors son œil immobile, il n'y avait qu'une seule couleur qui pût parvenir à cet œil, à l'aide de la réflexion produite par le papier. Mais ayant invité quelqu'un à faire tourner le prisme, soit dans un sens soit dans l'autre, autour de son axe, il vit paraître successivement des suites diversement colorées d'anneaux concentriques, de manière que ceux qui se présentaient simultanément étaient tous d'une même couleur. Les anneaux rouges avaient leurs diamètres sensiblement plus grands que les violets, et Newton dit qu'il avait un plaisir extreme à voir les anneaux passer tour à tour par différens degrés de dilatation ou de contraction, à mesure que les couleurs se succédaient. Il résultait de l'ensemble des observations que le violet était la couleur qui donnait, en général, les plus petits anneaux, et qu'ensuite les diamètres croissaient graduellement dans l'ordre où s'offraient les autres couleurs, c'est-à-dire, le bleu, le vert, le jaune et le rouge. Ainsi, le premier des anneaux bleus était un peu plus éloigné du centre que le premier des violets; le

(1) *Optice Lucis*, lib. II, pars 1, observ. 12, 13, 14, etc.

premier des anneaux verts était situé un peu au-delà du premier des anneaux bleus, etc.; il en était de même des seconds, des troisièmes, etc., pris dans les différentes séries.

987. De plus, la même couleur qui était réfléchie à certains endroits de la lame d'air, était transmise dans les espaces intermédiaires. Les carrés des diamètres des anneaux qui provenaient de la réflexion, suivaient, ainsi que dans la première observation, les rapports des nombres impairs 1, 3, 5, 7, 9, etc.; et les carrés des diamètres des anneaux produits par la couleur réfractée, étaient entre eux comme les nombres pairs 2, 4, 6, 8, 10, etc.; d'où il résultait que les épaisseurs de la lame d'air aux endroits qui réfléchissaient la couleur et à ceux où la réfraction avait lieu étaient soumises respectivement aux mêmes rapports.

988. Les épaisseurs dont nous venons de parler avaient été mesurées aux points où la couleur soit réfléchie, soit réfractée, était la plus vive. En partant de ces points, l'intensité de la lumière se dégradait indéfiniment de part et d'autre. Or, Newton ayant pour but d'assigner des largeurs aux différens anneaux, ce qui exigeait qu'il assignât aussi des limites aux dégradations dont nous venons de parler, adopta l'hypothèse suivante, qui était la plus simple que l'on pût faire.

989. Concevons que dans la série 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, etc., le terme 2 représente maintenant l'épaisseur de la lame d'air à l'endroit où le premier des anneaux violets vus par réflexion et relatifs à une même position du prisme, est le plus fortement coloré, et appelons-la *l'épaisseur moyenne* de l'anneau. Celle du second sera 6, puisqu'elle est à celle du premier comme 3 est à 1; celle du troisième sera 10, etc. Par la même raison l'épaisseur moyenne du premier anneau violet vu par réfraction sera 4; celle du second sera 8; celle du troisième sera 12, etc.

Pour fixer maintenant les épaisseurs extrêmes, ou celles qui ont lieu aux deux extrémités de la largeur de chaque anneau, ce qui se présente de plus naturel est de supposer que, relativement au premier des anneaux violets vus par réflexion, la

plus petite soit représentée par 1 et la plus grande par 3. De même les deux nombres situés l'un à la gauche et l'autre à la droite d'un nombre quelconque qui est l'expression d'une épaisseur moyenne, représenteront les épaisseurs extrêmes de l'anneau correspondant, de manière que chacune de ces épaisseurs sera commune à deux anneaux consécutifs vus l'un par réflexion et l'autre par réfraction. Les épaisseurs relatives aux anneaux des autres couleurs suivront le même rapport.

990. L'apparition de chaque couleur avait une petite durée, qui répondait à un certain mouvement du prisme, pendant lequel on voyait naître successivement différentes nuances de cette même couleur, jusqu'à ce qu'une nouvelle couleur vînt, à son tour, offrir une semblable succession. Or, en supposant le mouvement du prisme uniforme, les différentes couleurs arrivaient, les unes plus tôt, les autres plus tard à leur dernier degré de dilatation, ou au plus grand accroissement du diamètre de leurs anneaux. La plus petite dilatation était celle de la couleur violette, et la plus grande celle de la couleur rouge, ce qui est le contraire de ce qu'on observe dans le spectre solaire, où le rouge est la couleur la plus resserrée et le violet la plus étendue. Newton ayant mesuré les épaisseurs de la lame d'air, aux endroits qui offraient les limites des sept couleurs relatives à une même série, et prises dans l'ordre suivant, rouge, jaune, orangé, vert, bleu, indigo, violet, trouva qu'elles étaient comme les racines cubiques des carrés des nombres 1, $\frac{8}{9}$, $\frac{5}{6}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{5}$, $\frac{9}{16}$, $\frac{1}{2}$, ou comme les nombres 10000, 9243, 8855, 8255, 7631, 7114, 6814, 6300 (1); et il est remarquable que

(1) Ces nombres sont censés représenter les épaisseurs moyennes des anneaux qui forment les limites des sept couleurs considérées dans une même série, c'est-à-dire, les épaisseurs qui répondent aux endroits où la réflexion est la plus vive. La figure 136 servira à donner une idée de leurs positions relativement aux couleurs dont il s'agit. Le nombre 6300 indique l'épaisseur moyenne de l'anneau qui donne la première nuance de violet; le nombre 6814 désigne l'épaisseur qui répond à l'endroit où finit le violet et où commence l'indigo, et ainsi de suite, jusqu'au nombre 10000, qui est l'épaisseur moyenne de l'anneau situé à l'endroit où se termine le rouge.

la

la progression d'où ces nombres ont été extraits, soit celle qui représente, comme on l'a vu (948), les sinus de réfraction des couleurs relatives aux mêmes limites, avec la différence que dans ces dernières couleurs elle va du violet au rouge. La lumière reproduit ici, sous une nouvelle forme, le type de l'échelle qui constitue notre gamme musicale dans le mode mineur (494).

991. Maintenant, lorsque les deux objectifs étaient exposés à la lumière du jour, les diverses couleurs qui composent cette lumière formaient, toutes à la fois, leurs anneaux aux mêmes distances que quand elles agissaient séparément dans la seconde expérience; et si telles avaient été ces distances, que les anneaux des différentes couleurs ne pussent anticiper les uns sur les autres, chaque série aurait présenté par ordre autant de couleurs distinctes; mais les anneaux ayant des largeurs plus ou moins sensibles, et étant plus ou moins serrés entre eux, dans l'espace qu'ils occupaient, se confondaient, du moins en partie, à certains endroits, ce qui avait lieu spécialement dans la première série, qui renfermait une petite bande annulaire d'un blanc vif, produit par le mélange de toutes les couleurs (1). Dans chacune des séries suivantes, les couleurs étaient en général plus distinctes; mais passé un certain terme, les séries voisines anticipaient elles-mêmes les unes sur les

(1) Soit $\nu 1 r 2$ (*fig.* 137) une coupe de la lame d'air, prise dans l'espace auquel répondent les couleurs de la première série. Soit $\nu 2$ l'épaisseur moyenne de l'anneau qui donne la première nuance de violet, et $\nu 1$, $\nu 3$ les deux épaisseurs extrêmes. Soit de même V2 l'épaisseur moyenne à l'endroit où finit le violet et où commence l'indigo, et V1, V3 les épaisseurs extrêmes. Soit enfin $r 2$ l'épaisseur moyenne à l'endroit où commence le rouge et où se termine l'orangé, et $r 1$, $r 3$ les épaisseurs extrêmes. On aura (*fig.* 136 et 137) $\nu 2 = 6300$; $V 2 = 6814$; $r 2 = 9243$. Donc (*fig.* 137) $\nu 1 = \frac{6300}{2}$, $\nu 3 = \frac{3}{2}(6300)$, $V 1 = \frac{6814}{2} = 3407$; et $V 3 = \frac{3}{2}(6814) = 10221$. De plus, $r 1 = \frac{2 \cdot 9243}{4} = 4621 + \frac{1}{2}$, et $r 3 = \frac{3}{2}(9243) = 13864 + \frac{1}{2}$. Donc $r 1$ est plus petite que $\nu 2$, et $r 3$ plus grande que V3. Donc la position de $r 1$ étant à la gauche de $\nu 2$, et celle de $r 3$ étant à la droite de V3, le violet et le rouge se confondent sur l'espace $\nu 23 V$.

Or, le violet et le rouge étant les couleurs extrêmes de la série, il est facile de concevoir que la plus petite des épaisseurs extrêmes de la première nuance

autres : de là les couleurs, tantôt simples ou à peu près, tantôt plus ou moins mélangées et diversement nuancées, que présentaient successivement les différentes séries. Les rayons qui se réfractaient dans les intervalles des anneaux formés par la réflexion des couleurs isolées se combinaient d'une manière analogue; ensorte que tel degré de ténuité dans un point donné de la lame d'air, était propre en même temps à la réflexion de telle couleur simple ou mélangée, et à la transmission de telle autre couleur.

992. Toutes ces couleurs pâlissaient et s'effaçaient à une certaine distance du centre, parceque les différens rayons, en se mêlant à peu près dans des proportions égales, ne produisaient plus qu'une lumière blanchâtre.

Diversité des Substances susceptibles d'offrir des Anneaux colorés.

993. Il n'est pas nécessaire que la lame qui présente les anneaux colorés soit d'une matière fluide. Les lames d'un corps solide ont la même propriété, pourvu qu'elles soient réduites à un certain degré de ténuité. Il est possible, par exemple, d'amincir une lame de mica, au point qu'elle devienne capable de réfléchir une ou plusieurs des couleurs qu'offre la lame d'air, dans la première expérience de Newton.

---

d'une couleur quelconque intermédiaire, telle que le vert, étant moindre que *r*1 et plus grande que V1, sera située entre ces deux lignes, tandis que la plus grande des épaisseurs extrêmes de la dernière nuance de la même couleur étant plus considérable que V3, sera située à la droite de cette ligne, d'où l'on conclura que toutes les couleurs doivent se confondre sur l'espace *r*23V, et y produire une couleur blanche par leur mélange.

Un raisonnement semblable prouvera que la même chose ne peut avoir lieu dans les autres séries, où il n'y a qu'une partie des couleurs relatives à chacune d'elles qui soient mêlées. Newton a imaginé une construction ingénieuse, qui rend sensible à l'œil la manière dont différentes couleurs homogènes se dégagent les unes des autres à certains endroits de la lame d'air, et s'associent plusieurs ensemble à d'autres endroits, pour produire des couleurs composées. *Optice Lucis*, lib. II, pars 2, *versùs initium*.

Et ce qui est remarquable, c'est que les couleurs dont il s'agit ne dépendent point, quant à leur espèce, de la nature du milieu environnant : que l'on mouille la lame de mica, elles deviendront seulement plus faibles que quand cette lame était entourée d'air ; mais il n'y aura que leur intensité qui soit changée.

994. Ceci nous conduit à parler de quelques expériences faites par Mazéas, et dont les résultats ont paru ne pas s'accorder avec l'explication que donne Newton, du phénomène des anneaux colorés (1). Dans ces expériences, deux verres superposés ne laissaient pas d'offrir le même phénomène, lorsqu'ils étaient placés sous un récipient purgé d'air, ou lorsqu'on les exposait à une chaleur assez forte pour chasser ce fluide de l'espace intermédiaire. On peut répondre que, dans le premier cas, on n'obtient jamais un vide parfait, et qu'en supposant la chose possible, dans le second cas, l'espace compris entre les deux verres est occupé au moins par le calorique ; en général, une matière quelconque, quelque rare qu'elle soit, resserrée entre les deux verres, suffit pour faire naître des anneaux de diverses couleurs, et peut-être même les réflexions ou les réfractions des rayons qui produisent ces anneaux, auraient-elles lieu dans le cas où l'espace dont il s'agit serait entièrement vide de toute matière, ensorte qu'elles dépendraient des seules distances entre les points correspondans des deux surfaces par lesquelles les verres se regardent.

995. Newton appelle *accès* ou *retours de facile réflexion*, les dispositions successives d'un même rayon à être réfléchi par différentes épaisseurs d'une lame d'air ou de toute autre substance, et *accès* ou *retours de facile transmission*, les dispositions de ce rayon à être transmis par les épaisseurs intermédiaires. Ainsi, un rayon est dans un de ses retours de facile réflexion lorsqu'il tombe sur une lame de quelque substance, dont l'épaisseur est un des termes de la série 1, 3, 5,

(1) Mémoires de l'Académie de Berlin, 1752. *Voyez* aussi l'Optique de Smith, not. 493 et suiv.

7, 9, etc., en prenant pour l'unité la plus petite épaisseur qui soit capable de réfléchir ce rayon ; et de même il est dans un de ses accès de facile transmission, lorsque l'épaisseur de la lame qui le reçoit est [illegible]s termes de la série 2, 4, 6, 8, etc. (1)

Application des Résultats précédens aux Couleurs des Corps opaques.

996. Voici maintenant les conséquences que Newton a déduites de toutes ces observations relativement à la coloration des corps. Les particules de ces corps, même de ceux que nous appelons opaques, sont réellement transparentes ; c'est ce qu'observent tous les jours ceux qui font usage du microscope. Les bords amincis du caillou le plus opaque paraîtront, même à la vue simple, avoir un certain degré de transparence, si on les place entre la lumière et l'œil ; et quant aux substances métalliques blanches, qui sembleraient d'abord devoir être exceptées, Newton observe que l'action d'un acide peut les atténuer au point de rendre leurs particules perméables à la lumière (2).

997. Dans chaque corps, les particules sont séparées entre elles par de petits interstices qu'on nomme *pores*, et qui renferment différens fluides subtils. Ces particules ayant une épaisseur déterminée, repoussent les rayons qui, en les pénétrant, se trouvent dans un retour de facile réflexion, et le corps prend ainsi la couleur ou simple ou mélangée, analogue à celle des rayons réfléchis, et qui dépend du degré de ténuité des particules.

998. Effectivement, nous avons vu (993) que les anneaux colorés naissent aussi bien dans les lames des corps solides que dans celles des liquides ou des fluides ; et puisque chaque petit espace, compris dans une de ces lames, réfléchit ou

---

(1) *Optice Lucis*, lib. II, pars 3, propos. 13, *definitio*.

(2) *Ibid.*, lib. II, propos. 2.

réfracte la lumière, il en résulte que si l'on divisait cette lame en une multitude de petits fragmens, chacun de ceux-ci produirait encore le même effet que quand il formait continuité avec les autres. Or, les particules d'un corps pouvant être assimilées aux fragmens séparés d'une lame, tout ce que l'on dit de cette lame s'y applique exactement.

999. En parlant des particules des corps, on ne prétend pas désigner leurs plus petites molécules, ou celles que nous appelons *molécules intégrantes*. Pour concevoir ce qu'on doit entendre par les particules qui réfléchissent la lumière, on peut supposer, avec Newton, que les molécules intégrantes déjà séparées les unes des autres par des pores forment, au moyen de la réunion d'un certain nombre d'entre elles, d'autres molécules du second ordre, séparées par des pores plus étendus; que celles-ci, à leur tour, composent des molécules du troisième ordre, avec des interstices toujours plus considérables, et ainsi de suite (1). Or, les particules qui réfléchissent la lumière, dans l'état ordinaire d'un corps, ont une certaine épaisseur, d'où résultent entre elles des séparations d'une certaine étendue : ces particules sont censées alors isolées relativement à celles qui les avoisinent. Les milieux qui les interceptent; savoir, les fluides subtils qui occupent leurs pores, et l'air qui environne leur surface extérieure, font l'office des deux verres, entre lesquels est comprise la lame d'air dans l'expérience de Newton; par exemple, dans une lame de mica d'une épaisseur sensible, il y a des particules d'un certain ordre, qui ont la propriété de réfléchir les rayons d'un blanc jaunâtre; et ce sont celles qui se trouvent naturellement à des distances respectives suffisantes, pour que la lumière agisse sur elles comme si elles étaient seules. Si vous divisez cette lame par feuillets jusqu'à un certain degré de ténuité, vous isolez des particules d'un autre ordre qui réfléchiront d'autres couleurs, ainsi que le confirme l'observation.

1000. Nous avons parlé, à l'article de la divisibilité (27),

(1) *Optice Lucis*, lib. III, quæst. 31.

d'une lame détachée d'un morceau de mica, dont tel était le degré de ténuité, que sa couleur primitive, qui offrait le blanc jaunâtre, avait passé au bleu le plus intense. Nous sommes maintenant en état de concevoir comment les propriétés de la lumière peuvent être employées à saisir ces petites quantités, qui échappent à nos moyens mécaniques le plus susceptibles de précision. Suivant Newton, l'épaisseur de la lame d'air, à l'endroit qui réfléchit le bleu pur dans le phénomène des anneaux colorés, est égale à 2,4 millionièmes de pouce, pris sur le pied anglais. Or, d'après le principe énoncé plus haut (984), l'épaisseur de la lame de mica dont nous avons parlé devait être à celle de la lame d'air à l'endroit qui offre le bleu pur, comme le sinus d'incidence est à celui de réfraction, lorsque la lumière passe du mica dans l'air; mais comme le mica ne se prête point aux expériences qui donneraient immédiatement la loi de sa réfraction, on y a suppléé en profitant de cette autre observation de Newton, que les puissances réfractives des substances sont à très-peu près proportionnelles à leur densités (908), pourvu que ces substances soient l'une et l'autre inflammables ou non inflammables.

1001. Cela posé, soit *cr* (*fig.* 138) un rayon de lumière qui rencontre la surface d'un morceau de mica, sous un angle infiniment petit, et soit *rg* le rayon réfracté, dont on déterminerait la direction, si le mica avait en même temps assez d'épaisseur et de transparence pour que cette détermination fût possible. Soit, dans la même hypothèse, *rg'* le rayon réfracté relatif à une seconde substance, dont on connaisse la puissance réfractive, et qui servira de terme de comparaison. Nous avons choisi, pour cet effet, le sulfate de chaux, dont telle est, suivant Newton, la puissance réfractive, que si l'on désigne par l'unité la quantité constante *rn*, on aura $(g'n)^2 = 1{,}213$.

Maintenant la densité du mica, déterminée d'après la pesanteur spécifique, est à celle du sulfate de chaux comme 2,792 : 2,252. On aura donc $(g'n)^2$ ou 1,213 : $(gn)^2$ :: 2,252 : 2,792. Opérant par logarithmes, on trouvera pour

celui de *gn*, 0,0886039, d'où l'on conclura que l'angle de réfraction *rgn* est de $39^{d.}$ $11'$; et parceque, dans le cas présent, l'angle d'incidence est droit, le rapport entre les sinus, lorsque la lumière passe du mica dans l'air, sera celui du sinus de $39^{d.}$ $11'$ au sinus total. Or, ce rapport étant le même que celui qui existe entre l'épaisseur de la lame d'air désignée par 2,4 millionièmes de pouce, et celle de la lame de mica qui réfléchit le beau bleu, on trouvera pour cette dernière 1,511 millionième de pouce anglais, ou environ 1,6 millionième de pouce, pris sur le pied français (1), c'est-à-dire, à peu près 43 millionièmes de millimètre.

1002. La disposition d'un rayon à être réfléchi ou réfracté par telle particule d'un corps, dépend à la fois des deux surfaces de cette particule, puisqu'il ne tient qu'à une distance plus grande ou plus petite entre ces surfaces, que le rayon ne soit réfléchi au lieu d'être réfracté, ou réciproquement. De là vient que si l'on mouille l'une ou l'autre des faces d'une lame très-mince de quelque substance, telle que le mica, les couleurs s'affaiblissent à l'instant ; d'où il faut conclure que la réflexion ou la réfraction se fait près de la seconde surface ; car si elle se faisait auprès de la première, ou avant que le rayon eût pénétré dans la particule, la seconde n'aurait aucune influence sur la réflexion ou la réfraction de ce rayon. De plus, la disposition dont il s'agit se propage et persiste dans le rayon, depuis la première surface jusqu'à la seconde ; autrement, lorsque le rayon est parvenu à cette seconde surface, la première n'entrerait plus pour rien dans l'action qui le détermine à être réfléchi ou réfracté (2).

1003. La couleur d'un corps est d'autant plus vive et plus pure, toutes choses égales d'ailleurs de la part des milieux environnans, que les molécules de ce corps sont plus minces ;

---

(1) Selon l'Encyclopédie Méthodique, Mathématiques, t. II, seconde partie, p. 580, le pied anglais vaut 11 pouces 4 lignes $\frac{5}{9}$, ou $\frac{173}{9}$ lignes du pied français.

(2) *Optice Lucis*, lib. II, pars 3, propos. 12.

de même que dans la lame d'air de l'expérience de Newton, les parties les plus déliées ou les plus voisines du centre sont celles où les couleurs se montrent avec le plus de force et d'éclat. De plus, parmi les molécules qui réfléchissent des couleurs d'un seul ordre, celles qui donnent le rouge sont les plus épaisses, et celles qui donnent le violet sont les plus minces.

Cause des Réflets irisés qu'on observe dans divers Minéraux.

1004. La nature nous offre dans plusieurs pierres un phénomène analogue à celui des anneaux colorés : de ce nombre est l'agathe opaline ou l'opale, qui, dans les reflets qu'elle lance de son intérieur, semble réunir les teintes du rubis, de la topaze, de l'émeraude, du saphir, animées d'une vivacité particulière. Cette pierre ne doit sa beauté qu'à ses imperfections, et à la multitude de fentes et de gerçures qui interrompent la continuité de sa matière propre, et forment des vides occupés par un fluide subtil qui est probablement l'air. Les petites lames de ce fluide sont précisément dans le même cas que la lame d'air renfermée entre les deux objectifs dans l'expérience de Newton : aussi les couleurs de l'opale disparaissent-elles dès qu'on la brise.

Le carbonate de chaux transparent, le sulfate de chaux, le cristal de roche, etc., présentent aussi assez souvent à l'intérieur des reflets diversement colorés, que l'on doit attribuer de même à de légères fissures qui se sont faites naturellement dans la pierre, ou que la percussion y a produites.

Explication des Couleurs changeantes de certains Corps.

1005. La densité des molécules des corps surpasse de beaucoup, en général, celle des milieux qui occupent les interstices entre leurs lames composantes, et de l'air qui en-

vironne ces corps. De là vient que les couleurs des mêmes corps, vues sous différens degrés d'obliquité, ne changent pas sensiblement; mais si l'on suppose que les lames n'aient guère plus de densité que les milieux environnans, alors un changement tant soit peu considérable dans leur position, à l'égard de l'œil, fera varier leurs couleurs (1).

Pour saisir la raison de cette différence, supposons que *ablk* (*fig.* 139) représente la coupe d'une lame de quelque substance, dont la densité soit incomparablement plus grande que celle du milieu qui environne cette lame; dans ce cas, un rayon de lumière *rc*, qui rencontrera la surface de cette lame sous une obliquité quelconque, se réfractera dans l'intérieur, suivant une direction *ci* qui s'écartera très-peu de la perpendiculaire *un* au point d'immersion, à cause de la grande différence entre le sinus d'incidence et celui de réfraction. Qu'un autre rayon incident *r'c* rencontre la même surface sous une obliquité sensiblement différente; le rayon réfracté *co* ne s'écartera pas beaucoup plus de la perpendiculaire *un*, et par-conséquent les espaces entre *ab* et *kl*, mesurés par les deux rayons réfractés, ne différeront que d'une petite quantité; d'où il suit que la couleur qui dépend de ces espaces ne subira qu'un léger changement. Supposons, au contraire, que la densité de la lame *ablk* approche d'être égale à celle du milieu environnant: dans ce cas, les rayons incidens *dg*, *sg* ne subiront qu'une légère inflexion en traversant la lame; ensorte que les rayons réfractés *gp*, *gm* étant presque sur la direction des rayons incidens, il en résultera une grande différence entre les espaces mesurés par ces rayons, et en même temps entre les couleurs relatives à ces espaces.

1006. Ceci peut servir à faire concevoir les changemens que subissent les couleurs de certains corps, sous différentes positions de l'œil; telles sont celles qui embellissent le plumage de plusieurs oiseaux, et en particulier celui du paon. Ces couleurs, déjà si riches et si variées sous le même aspect,

(1) *Optice Lucis*, lib. II, pars 3, propos. 6.

se diversifient encore en devenant mobiles avec l'oiseau lui-même, dont chaque position produit un jeu de reflets qui disparaissent sous une autre position, pour faire place à de nouveaux reflets, et aller eux-mêmes se reproduire ailleurs : toutes ces belles apparences proviennent de ce que les barbes qui s'insèrent latéralement sur les rameaux des plumes de l'oiseau sont d'une ténuité qui avive les couleurs, et en même temps d'une densité qui n'étant pas beaucoup plus considérable que celle du milieu environnant, fait varier la position des couleurs, à mesure que l'obliquité du rayon visuel varie elle-même (1).

1007. L'effet que nous venons de considérer a lieu aussi dans l'expérience des anneaux colorés (982), quoiqu'alors la lame d'air interceptée entre les deux verres soit incomparablement moins dense que la matière de ces verres ; mais c'est que dans ce cas la lumière, en s'écartant considérablement de la perpendiculaire au passage du verre dans la lame d'air, prend des positions dont l'obliquité change très-sensiblement, à mesure que la direction du rayon visuel s'incline elle-même plus ou moins, ce qui fait varier à proportion les épaisseurs mesurées par les rayons réfractés. Cet effet est l'opposé de celui que représente la *fig.* 139, où l'on considère *rc*, *r'c* comme les rayons incidens, et *co*, *ci* comme les rayons réfractés. Car il est évident que si, au contraire, ces dernières lignes sont censées être les rayons incidens, une variation un peu sensible dans leurs directions en produira une très-grande dans celle des rayons réfractés *cr*, *cr'*.

1008. On explique aisément, d'après les principes que nous avons exposés, les couleurs produites dans certaines liqueurs qui n'en avaient aucune sensible, par le mélange d'une de ces liqueurs avec l'autre, ou les changemens de couleur que subit, dans le même cas, une liqueur naturellement colorée. Ainsi, l'acide nitrique, versé dans l'alkohol, où l'on a fait infuser assez légérement des feuilles de rose pour qu'il n'en prît point

(1) *Optice Lucis*, lib. II, pars 3, propos. 5.

la teinte, développe tout à coup une couleur semblable à celle qu'avaient les roses avant l'infusion. Le même acide, mêlé à la teinture de tournesol, change le bleu en un rouge vif. Le sirop de violette devient vert par l'addition d'un alkali. Dans tous ces mélanges, la réunion des molécules des deux liquides forme des molécules mixtes, dont l'épaisseur est différente de celle des molécules composantes, et détermine la réflexion de la couleur analogue à cette épaisseur.

Application de la même Théorie aux Corps transparens non colorés.

1009. Considérons maintenant les accès de facile réflexion et de facile transmission dans les corps transparens, et commençons par ceux qui sont limpides et sans couleur. Les particules de ces corps surpassent en ténuité la plus petite épaisseur qui soit capable de réfléchir la lumière, et en conséquence les rayons qui pénètrent les molécules situées à la surface, sont transmis; car les particules dont il s'agit sont dans le même cas que la petite lame d'air située près du contact des deux objectifs dans l'expérience des anneaux colorés, et qui transmettait toutes les couleurs sans en réfléchir aucune. Les rayons qui ont pénétré un milieu limpide continuent donc leur route dans toute l'épaisseur du milieu, sans qu'aucun se réfléchisse près du contact des molécules avec les milieux subtils renfermés dans les pores, comme si ces molécules formaient entre elles une parfaite continuité. Pendant tout ce trajet, les rayons conservent néanmoins leur disposition à être réfléchis ou réfractés, en vertu des accès de facile réflexion ou de facile transmission, de manière que si l'on désigne par e une certaine épaisseur qui aurait déterminé la réflexion de telle espèce de rayon, dans le cas où le milieu n'aurait que cette épaisseur, le même rayon conservera une tendance à être réfléchi à tous les points dont les distances à la première surface sont représentées par $3e$, $5e$, $7e$, $9e$, etc., et il sera disposé à être transmis aux distances $2e$, $4e$, $6e$, $8e$, $10e$, etc. De même si l'on désigne par e' une cer-

taine épaisseur analogue à la réflexion d'une autre espèce de rayons, en supposant que le milieu n'eût que cette épaisseur, le rayon sera disposé à être réfléchi ou transmis à des distances représentées les unes par $3e'$, $5e'$, $7e'$, etc., les autres par $2e'$, $4e'$, $6e'$, $8e'$, etc. Ces distances sont ce que Newton appelle les *intervalles de facile réflexion*, ou *de facile transmission*, (1).

1010. L'une et l'autre tendance n'ont leur effet que quand la lumière est arrivée à la seconde surface du corps. Là, toute la partie de la lumière qui, à raison de la distance entre les deux surfaces ou de la série d'intervalles, se trouve dans un accès de facile réflexion, est réfléchie près du contact de la seconde surface avec le milieu adjacent, et la partie qui se trouve dans un accès de facile transmission se réfracte en passant dans le milieu adjacent; de manière que si le milieu avait une épaisseur différente, qui donnât pour chaque accès une unité de plus ou de moins, les rayons changeraient de rôle; ceux qui auraient été dans leur accès de facile réflexion se trouveraient dans leur accès de facile transmission, et réciproquement.

On voit par là pourquoi il y a toujours une partie de la lumière qui se réfléchit au contact de deux milieux de densité différente, en échappant à la réfraction que subit l'autre partie (887).

1011. Dans tout ce que nous avons dit jusqu'ici des accès, nous n'avons considéré que ce qui se passe dans le trajet des rayons, depuis la première surface jusqu'à la seconde; mais la réflexion ramène une partie des rayons de la seconde surface à la première, et il s'agit de savoir quelle sera leur disposition pendant ce retour, et dans quel accès ils se trouveront à cette preinière surface.

Pour développer ce point de théorie, reprenons les choses dès l'origine, et supposons que ab, cd (*fig.* 140) soient deux faces exactement parallèles d'un milieu quelconque plus dense

(1) *Optice Lucis*, lib. II, pars 3, propos. 12.

que l'air, et environné de ce fluide. Soit *gn* un faiscean de lumière qui tombe sur la surface *ab*. Parmi les rayons qui composent ce faisceau, les uns seront dans un accès de facile réflexion, et en conséquence se réfléchiront suivant *nx* inclinée en sens contraire de la même quantité que *gn*; les autres étant dans un accès de facile transmission se réfracteront suivant *no*.

L'un et l'autre accès seront déterminés par l'espèce d'intervalles que chaque rayon aura parcourus dans l'air; de manière que si le point radieux est au milieu de ce même fluide, tous les rayons à l'égard desquels le trajet depuis ce point jusqu'au point *n* sera compris dans la série 1, 3, 5, 7, etc., seront réfléchis, l'unité représentant ici la plus petite épaisseur d'air qui soit capable de réfléchir chaque rayon, et tous ceux à l'égard desquels le même trajet sera compris dans la série 2, 4, 6, 8, etc., seront transmis suivant *no*.

Ces derniers rayons se trouvant alors dans un milieu différent, où les intervalles ne sont plus les mêmes, les uns en arrivant au point *o* seront de nouveau dans un accès de facile réflexion, et seront repoussés suivant *or*, l'angle *roc* étant égal à l'angle *nod*; les autres seront dans un accès de facile transmission, et repasseront dans l'air suivant oz parallèle à *gn*.

1012. Or, comme nous supposons un parfait parallélisme entre les lignes *ab*, *cd*, il en résulte que les rayons réfléchis suivant *or* parcourent un espace égal à celui qu'ils avaient parcouru dans la direction *no*. Maintenant les intervalles de facile réflexion qu'a mesurés le rayon qui parcourait *no*, ou, ce qui revient au même, les distances auxquelles il s'est trouvé successivement par rapport au point *n*, à la fin de chaque intervalle, sont compris dans la progression des nombres impairs 1, 3, 5, 7, 9, etc. Or, le rayon conserve, après sa réflexion suivant *or*, la disposition qu'il aurait suivie en ligne directe, si le milieu eût été prolongé en dessous de *cd*. Il en résulte que quand il est parvenu, par exemple, en *t*, sa distance au point *n* doit être considérée comme étant égale à la somme des lignes *on* plus *ot*. Désignons par E l'intervalle ou la distance que mesure *on*. Les distances suivantes, ou celles qui répondent à la

ligne *or*, seront représentées par E+2, E+4, E+6, etc. Donc la progression 0, 2, 4, 6, etc. qui est censée être une extension de celle qui a donné E, représentera les intervalles de facile réflexion, à partir du point o; d'où il suit que la progression des nombres intermédiaires 1, 3, 5, 7, etc., deviendra celle des accès de facile transmission, en partant du même point, ce qui est l'ordre inverse de celui qui a lieu, par rapport aux accès compris entre les points *n* et o. Donc, puisque *or* est égale à *no*, le rayon arrivé en *r* se trouvera dans un cas contraire à celui où il était au point o, c'est-à-dire, qu'il sera transmis par la surface *ab*.

Si au lieu de prendre une nouvelle série après la réflexion en o, on considère les deux lignes *no*, *or*, comme ne formant qu'une seule ligne, la quantité 2E mesurée par cette ligne étant un nombre pair, les termes de la série unique à laquelle elle appartiendra seront 0, 2, 4, 6, 8, etc., ensorte qu'en envisageant la chose sous ce point de vue, on concevra encore que le rayon doit se réfracter en *r*.

Concluons de là que les rayons qui se sont réfléchis sur la seconde surface d'un milieu, subissent dans leur retour vers la première surface des effets inverses de ceux qui avaient lieu dans le trajet depuis la première jusqu'à la seconde; ensorte qu'après la réflexion, les accès de facile transmission succèdent à ceux de facile réflexion (1).

Mais si les deux faces entre lesquelles se meut la lumière n'étaient pas exactement parallèles, ou si elles avaient des inégalités sensibles, alors, parmi les rayons réfléchis suivant *or*, ceux qui auraient à parcourir un intervalle plus grand ou plus petit d'une unité, pour revenir à la surface *ab*, seraient réfléchis de nouveau vers *cd*, tandis que les autres seraient transmis par la surface *ab*.

1013. Ce que nous venons de dire a fourni au Père Boscovich la solution d'une difficulté proposée par lui-même

(1) *Optice Lucis*, lib. II, pars 3, propos. 19.

contre l'explication de l'arc-en-ciel extérieur (1) ; voici en quoi elle consiste. Soit *ng* (*fig.* 141) une des gouttes de pluie qui produisent cet arc, et *shgfna* la route d'un faisceau de rayons d'une couleur quelconque, pris parmi les rayons efficaces : ce faisceau étant parvenu de *h* en *g*, une partie est transmise dans l'air environnant, et l'autre se réfléchit suivant *gf*. Or, les rayons qui sont entrés par le point *h* étaient dans un accès de facile transmission, et ceux qui se sont réfléchis en *g* étaient dans un accès de facile réflexion. Maintenant la corde *gf* étant égale à la corde *hg*, mesure la même série d'intervalles ; et puisque les rayons qui partent de la réflexion en *g* pour aller en *f* subissent des effets inverses de ceux qui ont eu lieu en partant de la réflexion en *h*, il s'ensuit qu'ils devraient se trouver en *f* dans un accès de facile transmission, et parconséquent il n'y aurait aucun de ces rayons qui dût être réfléchi de *f* en *n* ; mais ils sortiraient tous par ce point, ce qui rendrait impossible la formation de l'arc extérieur.

Le Père Boscovich répond en observant que la difficulté n'a lieu qu'autant qu'on suppose les gouttes de pluie parfaitement sphériques ; et, c'est ce qui n'est pas à présumer, d'après cela seul, que chaque goutte est un peu comprimée dans sa partie inférieure par la réaction de l'air qu'elle frappe en tombant. Or, la plus légère différence entre les cordes *hg*, *gf* suffit pour qu'il y ait une unité de plus ou de moins d'un côté que de l'autre dans les intervalles mesurés par ces cordes, et pour que le rayon arrivé en *f* se trouve de nouveau dans un accès de facile réflexion, auquel cas il prendra la direction *fn*, et pourra se trouver en *n* dans un accès de facile transmission, qui le déterminera à repasser dans l'air suivant la direction *na*.

1014. La lumière qui traverse un milieu transparent ne parvient pas toute entière à la seconde surface de ce milieu ; mais cela provient uniquement de ce qu'il y a toujours des rayons interceptés par le milieu, où ils s'éteignent en se heur-

(1) Mémoires des Savans étrangers, t. III.

tant contre les molécules propres de ce milieu ; et le nombre de ces rayons interceptés augmente continuellement pendant tout le trajet du rayon.

Il résulte de là que l'intensité de la lumière sur un espace donné, à mesure qu'elle s'éloigne du point rayonnant, n'est pas exactement en raison inverse du carré de la distance, mais suit une loi qui diffère de celle-ci jusqu'à un certain point.

Bouguer a recherché cette loi, en supposant d'abord que le milieu eût une densité uniforme, et que les rayons fussent parallèles. Dans ce cas, il prouve que l'intensité de la lumière suit une progression géométrique. Il étend ensuite sa théorie aux milieux dont la densité est variable, et à l'hypothèse d'une divergence entre les rayons, et fait plusieurs applications intéressantes de cette théorie à divers phénomènes (1).

Cause de l'Opacité d'un grand nombre de Corps.

1015. L'opacité des corps qui ont cette qualité provient non-seulement de ce que les molécules de ces corps éteignent et absorbent la lumière, mais plus encore de ce que ces molécules se trouvent séparées par de nombreux interstices remplis de quelque fluide d'une densité très-inférieure à la leur ; d'où il résulte qu'il y a beaucoup de rayons qui sont repoussés près du contact des surfaces des molécules et du milieu adjacent ; et comme ces réflexions se multiplient rapidement, à mesure que les rayons pénètrent le corps, il arrive que bientôt ils échappent à la réfraction qui devrait se propager d'une surface à l'autre pour que le corps fût transparent (2).

1016. Ceci nous conduit à expliquer pourquoi la pierre nommée *hydrophane*, acquiert une transparence sensible lorsqu'elle a été plongée dans l'eau, et qu'on la place entre la lumière et l'œil. Nous avons vu (9) que cette pierre est criblée

(1) Bouguer, Traité d'Optique ; Paris, 1760, p. 231 et suiv.

(2) *Optice Lucis*, lib. II, pars 3, propos. 3.

d'une

d'une multitude de vacuoles qui, dans l'état naturel de l'hydrophane, sont remplis d'air. Le peu de densité de ce fluide, comparé à la matière propre de la pierre, occasionne la réflexion d'un grande partie des rayons qui la pénètrent, et ne laisse subsister qu'un faible degré de transparence, à l'aide du petit nombre de rayons qui poursuivent leur route jusqu'à la surface tournée du côté de l'œil. Mais si à la place de l'air l'eau s'introduit dans l'hydrophane, ce liquide ayant une densité qui se rapproche beaucoup plus de celle de la pierre, il y aura un bien plus grand nombre de rayons qui, au lieu d'être réfléchis au contact des deux milieux qui se succèdent dans l'intervalle entre les deux surfaces, seront réfractés et continueront leur trajet jusqu'à la surface située vers l'œil, ce qui fera croître la transparence dans un très-grand rapport. Le papier mouillé ou imbibé d'huile acquiert aussi de la transparence, par une cause semblable.

1017. A l'égard des corps qui joignent à la transparence une couleur déterminée, ils paraissent offrir un moyen terme entre les corps limpides et les corps opaques. Leurs molécules réfléchissent des rayons de la couleur sous laquelle ils s'offrent à l'œil, et en même temps ces corps transmettent dans toute leur étendue d'autres rayons, qui, pour l'ordinaire, ont la même couleur que les rayons réfléchis. Ainsi les molécules situées à la surface réfléchissent une partie des rayons qui arrivent à cette surface et laissent passer le reste ; de nouvelles molécules situées un peu plus bas, réfléchissent un certain nombre de rayons, parmi ceux qui ont échappé à la première réflexion, puis transmettent les autres, et ainsi de suite jusqu'à la dernière surface, qui réfléchit en partie les rayons qu'elle reçoit et les transmet en partie dans l'air voisin.

1018. Plus le corps coloré est transparent, plus aussi le nombre de rayons réfléchis dans son intérieur est petit, et plus en même temps la couleur est faible, lorsqu'on se borne à regarder le corps par réflexion. Elle devient au contraire très-vive, lorsqu'on place le corps entre la lumière et l'œil, parceque le nombre des rayons qui le pénètrent de part en

part étant, pour ainsi dire, en raison inverse de celui des rayons repoussés par la réflexion, l'œil reçoit une grande quantité de couleur transmise, qui lui apporte l'impression de la couleur du corps.

A mesure que le principe colorant est plus abondant, la couleur du corps vu par réflexion est plus intense, et en même temps la transparence diminue, ensorte qu'il y a un terme où l'effet principal de la couleur est dû à celle qui est réfléchie près de la surface tournée vers l'œil, et alors le corps placé entre l'organe et la lumière n'a plus qu'un faible degré de transparence.

Divers Exemples d'un Phénomène analogue à celui des Anneaux colorés.

1019. Il y a des milieux qui présentent une couleur différente, suivant qu'on les regarde par réflexion ou par réfraction, comme cela a lieu par rapport à chacun des petits espaces pris sur la lame d'air, dans l'expérience des anneaux colorés : telle est l'infusion de bois néphrétique, qui paraît bleue sous l'aspect ordinaire, et qui devient jaune lorsqu'on place entre l'œil et la lumière le vase qui la contient. Une lame d'or extrêmement mince continue de réfléchir le jaune et paraît verdâtre lorsqu'on la regarde par réfraction. Ces phénomènes, et d'autres semblables, suivant l'expression de Newton, *n'ont plus besoin d'un Œdipe* (1).

1020. On voit combien l'observation des anneaux colorés sert à lier de faits différens dans une même théorie ; mais on pourrait desirer que cette théorie remontât encore plus haut, et expliquât, d'après quelque hypothèse, pourquoi certains rayons sont transmis, tandis que d'autres sont réfléchis par une lame d'une épaisseur déterminée. On supposera, si l'on veut, d'après Newton (2), qu'il en est des rayons de la lumière

(1) *Newtonis Opusc.*, t. II, p. 290.

(2) *Optice Lucis*, lib. II, pars 3, propos. 12. *Ibid.* lib. III, quæst. 17.

à l'égard des différens corps naturels, comme des corps sonores à l'égard de l'air, c'est-à-dire, que les rayons excitent dans les molécules des corps qui les réfractent ou les réfléchissent, certaines vibrations qui se propagent d'une surface à l'autre, mais de manière que leur vîtesse est plus grande que celle des rayons eux-mêmes, ensorte qu'elles prennent, pour ainsi dire, les devants. Or, comme ces vibrations consistent dans de petits mouvemens qui ont lieu alternativement en sens contraire, si au moment où le rayon arrive près du contact de la surface réfléchissante ou réfringente, le mouvement de vibration dans lequel il se trouve conspire avec celui du corps, le rayon sera transmis; et si ce mouvement est opposé à celui du corps, le rayon sera repoussé et réfléchi (1). Or, telle est la manière dont les mouvemens se combinent, que le rayon est tour à tour dans la circonstance qui détermine la réflexion et dans celle d'où naît la réfraction. Au reste, Newton ne propose cette idée qu'en faveur de ceux qui cherchent à se satisfaire, en imaginant une cause physique aux faits d'où part la théorie. Quant à lui, il lui suffit d'en avoir établi l'existence et la filiation. Les physiciens, qui s'arrêtent sagement sur la limite tracée par l'observation, trouveront assez de quoi se satisfaire dans une théorie qui ramène les phénomènes infiniment variés de la coloration des corps à de simples distances entre les facettes des molécules, et qui leur offre cette admirable diversité de teintes et de nuances dont s'embellissent les productions de la nature et de l'art, sous l'aspect d'un tableau dont il suffit que la toile passe à un nouveau degré de ténuité, pour faire naître à l'instant un nouveau coloris.

(1) Cette hypothèse est très-différente de celle des physiciens qui faisaient consister la diversité des couleurs dans celle des vibrations imprimées à la lumière par les surfaces réfléchissantes. A l'aide de celle-ci, on cherchait à expliquer comment les rayons de la lumière, que l'on supposait homogènes, étaient réfléchis de manière à produire plutôt telle sensation de couleur que telle autre. Mais l'hypothèse de Newton consiste à faire voir comment, parmi les rayons hétérogènes de la lumière, telle espèce est transmise, tandis que telle autre est réfléchie.

Difficultés que l'on peut opposer à la Théorie précédente.

On vient de voir que la cause à laquelle Newton attribue la coloration des différens corps n'a aucune relation directe avec leur nature chimique, et dépend principalement de la dimension en épaisseur de leurs molécules, jointe à la densité de celles-ci, qui est une propriété physique. Les principes constituans n'ont ici qu'une influence éloignée, en tant que la densité et la figure des molécules dépendent des qualités de ces principes, de leurs quantités relatives et de la manière dont ils sont combinés entre eux. Mais depuis que la Chimie a fait des progrès rapides, qui ont eu une influence heureuse par rapport à la Physique elle-même, plusieurs des savans qui ont le plus contribué à la perfectionner, ont pensé que les couleurs des corps naturels étaient dues immédiatement à l'affinité que leurs molécules exerçaient de préférence sur certaines espèces de rayons, et personne n'a développé cette opinion avec plus de sagacité et de profondeur que le célèbre Bertholet (1).

1021. Avant de faire connaître les motifs de cette même opinion, nous observerons que Newton lui-même avait déjà donné entrée à la Chimie dans la Physique de la lumière, en ramenant plusieurs des phénomènes produits par ce fluide, à des actions dans les petites distances. Ainsi la réfraction et la réflexion étaient produites par des actions de ce genre, que les corps exerçaient sur la lumière (904), avec cette différence que l'action était attractive dans un cas et répulsive dans l'autre. Il avait même trouvé que la nature des corps influait sur l'énergie de la force réfractive, qui était plus considérable, toutes choses égales d'ailleurs, dans les corps inflammables que dans les autres. On a découvert depuis, que la quantité de l'écartement que subissent les rayons qui traversent un prisme, varie avec la nature des substances, ainsi que nous le ferons

(1) Traité sur la Teinture, t. I, p. 31 et suiv.

voir dans la suite, avec plus de détail. Il paraît aussi que la propriété qu'ont certains corps de faire subir deux réfractions à la lumière (870), a une relation avec la nature de ces corps.

1022. Mais dans tous ces phénomènes, l'influence directe des qualités physiques se manifeste d'une manière très-sensible. La réfraction, par exemple, suit en général le rapport des densités (908). La figure des molécules entre comme élément dans la double réfraction, puisque celle-ci n'a pas lieu relativement aux corps dans lesquels cette figure a un caractère particulier de symétrie et de régularité. La réflexion elle-même subit des variations qui évidemment sont indépendantes de la nature des corps; de ce nombre est la différence que le poli et l'éclat de la surface apportent dans la quantité de lumière réfléchie.

Notre savant chimiste ne nie pas lui-même que la réflexion produite par des lames très-minces et transparentes détachées d'un corps, ne dépende de la ténuité de ces lames; il adopte dans leur totalité les observations de Newton sur les anneaux colorés : il ne combat que les conséquences déduites de ce phénomène, pour expliquer la coloration des corps opaques.

1023. Une des objections les plus fortes, parmi celles qu'il oppose à ces conséquences, se tire de ce que certaines substances, telles que le carmin et l'indigo, ne changent pas de couleur, comme cela devrait avoir lieu, lorsqu'en les triturant, on atténue de plus en plus leurs particules. D'une autre part, lorsqu'on a dissous une certaine quantité d'indigo dans l'acide sulfurique, auquel cas il conserve sa couleur bleue, et qu'ensuite on étend la dissolution dans l'eau, les molécules qui passent par une multitude de dimensions toujours plus petites ne devraient pas continuer de réfléchir constamment des rayons bleus.

1024. On pourrait répondre que les particules d'indigo ou de carmin qui réfléchissent les couleurs ordinaires à ces substances, sont d'une si grande ténuité, que la division opérée par les moyens dont nous venons de parler n'atteint pas jusqu'à la limite nécessaire pour isoler des particules propres à la

réflexion d'une couleur différente (1). S'il est vrai, comme tout nous porte à le croire, que les corps soient composés de molécules réellement transparentes, on sera moins surpris de voir la couleur ordinaire du carmin ou celle de l'indigo se soutenir dans des opérations où les particules de ces substances ont encore de l'opacité. Le mica dont les morceaux tendent ordinairement vers la transparence, à moins qu'ils ne soient d'une certaine épaisseur, doit conduire bien plus tôt à la limite qui détermine une couleur particulière (1001).

1025. Il n'est cependant pas tout-à-fait exact de dire que les moyens mécaniques n'altèrent jamais la couleur d'une substance opaque. Newton a observé que quelques-unes des poussières colorées dont se servent les peintres, subissent un petit changement de couleur, à l'aide d'une longue et forte trituration, qui fait varier un peu l'épaisseur des particules réfléchissantes (2). Il arrive ordinairement, dans ce cas, que la couleur primitive passe à une nuance qui la rapproche d'une couleur voisine, dans l'ordre successif que présente le phénomène des anneaux colorés.

1026. On objecte encore que tous les acides changent en rouge les couleurs bleues végétales, et que les alkalis les changent en vert. Or, comment imaginer que les substances de chacune de ces deux classes, même celles qui diffèrent le plus par leur pesanteur spécifique et par leur fixité, agissent toutes de manière à déterminer le degré de ténuité qui convient à la réflexion d'une même couleur?

Nous demanderons d'abord si l'on n'a pas non plus quelque peine à concevoir, dans l'hypothèse où le changement de couleur serait dû à l'action chimique de l'acide ou de l'alkali,

---

(1) L'indigo, qui est celle des deux substances dont la division est poussée le plus loin, dans les opérations citées, a une densité considérable. Or, suivant la règle établie par Newton (984), le degré de ténuité qui répond à la réflexion de telle couleur, augmente à mesure que la densité elle-même va en croissant.

(2) *Optice Lucis*, lib. II, pars 3, propos. 5.

comment des principes très-différens par leurs qualités, s'accordent pour exercer le degré d'affinité qui produit constamment la réflexion de telle couleur rouge ou verte?

1027. Mais il nous semble que l'on peut affaiblir de beaucoup la difficulté par une réponse directe. Les expériences de Newton font voir que la propriété de réfléchir telle couleur dépend à-la-fois de la densité et de l'épaisseur des lames que pénètre la lumière; d'où il suit que la couleur verte, par exemple, peut être commune à des lames dont les densités diffèrent entre elles, pourvu que les épaisseurs varient dans le rapport qu'exige la réflexion de cette couleur. Mais il y a mieux, et l'on sait que la densité étant constante, une même couleur peut être réfléchie par diverses épaisseurs qui sont entre elles comme les nombres impairs, 1, 3, 5, 7, etc. Enfin, dans le phénomène des anneaux colorés, chaque anneau d'une couleur déterminée ayant une certaine largeur, les points de cette couleur répondent successivement à des épaisseurs qui vont en croissant à mesure qu'elles s'éloignent du centre. On voit par là que le phénomène dont il s'agit peut s'appliquer à la coloration des corps, de manière à donner une grande latitude, soit aux acides, soit aux alkalis, pour agir diversement, en laissant subsister pour l'œil la même apparence, relativement à l'espèce de couleur dont ils déterminent la réflexion. Avec l'affinité, au contraire, la diversité des agens semble devoir en entraîner une dans les effets eux-mêmes.

1028. Suivant l'opinion de notre savant chimiste, une couleur est composée de différentes espèces de rayons, lorsqu'elle dépend de la combinaison de plusieurs principes, dont chacun a déterminé la réflexion d'une des couleurs du mélange; et elle sera simple, si elle provient de l'union d'un seul principe avec la substance colorée. « Ainsi, dit-il, l'oxide vert de cuivre » ne peut être dû à des molécules différentes, et le vert des » plantes est sans doute produit par une substance homogène (1) ». Cependant, si l'on place sur un papier jaune une

(1) Traité de la Teinture, t. I, p. 57.

bande étroite de quelque substance colorée avec l'oxide de cuivre, et que l'on tienne ce papier entre la lumière et l'œil, en agitant un peu la bande verte, pour aider la sensation, cette bande paraîtra bleue, ce qui prouve, ainsi que nous le dirons bientôt (1), que la couleur verte de l'oxide de cuivre est un mélange de jaune et de bleu, et non pas une couleur simple. Nous avons soumis à la même expérience les feuilles de plusieurs graminées et d'une multitude d'autres plantes, et toutes ont paru d'un bleu plus ou moins foncé. L'émeraude qui est colorée par l'oxide de chrome, a offert un effet semblable. Or, cette observation, qui n'est pas favorable à l'action de l'affinité, s'accorde au contraire parfaitement avec ce qui se passe dans le phénomène des anneaux colorés, où les différentes espèces de rayons, en se mêlant à tous les endroits de la lame d'air interceptée entre les deux verres, donnent naissance à des couleurs plus ou moins composées.

1029. Nous voyons ce phénomène se reproduire dans plusieurs corps naturels, tels que le plumage de certains oiseaux, les métaux qui prennent un aspect irisé à la surface, les infusions de plusieurs bois, l'or réduit en lames minces, etc. Newton, qui connaissait si bien la force de l'analogie, en a conclu que le même effet avait lieu, en général, par rapport aux molécules de tous les corps, et que la nature se décelait encore ici elle-même, en offrant à nos observations un phénomène dans lequel on lisait pour ainsi dire les règles simples et précises qu'elle suivait dans sa manière ordinaire de peindre. En adoptant l'opinion contraire, non-seulement on se trouve forcé de donner deux échelles à l'action colorante, mais on est réduit à indiquer d'une manière vague, l'affinité, comme étant la cause de la coloration des corps opaques, sans pouvoir assigner aucune loi à son action, ni établir la liaison et la dépendance mutuelle des effets qu'on lui attribue. On doit être même embarrassé de concilier ici la force répulsive qui paraît produire la réflexion, avec l'affinité, qui est

(1) *Voyez* ci-après, l'article relatif aux couleurs accidentelles.

une force attractive. Au reste, nous ne regardons pas la question comme décidée sans retour. Mais les réflexions que nous venons de hasarder n'auront pas été inutiles, si elles fournissent à d'autres l'occasion de soumettre à un examen plus approfondi la matière d'une discussion où Newton est attaqué, et ne pouvait l'être par un adversaire plus digne de lui (1).

Des Couleurs accidentelles.

1030. La plupart des couleurs que la lumière fait naître, en se réfléchissant à la surface des corps opaques, ou en pénétrant les corps diaphanes, proviennent de la réunion de plusieurs couleurs simples et homogènes, dont les actions se combinent de manière à produire sur l'organe une impression unique, déterminée par le nombre et les différentes espèces de rayons réfléchis ou transmis. Mais il y a des circonstances où les rayons qui colorent la surface d'un corps, en restant les mêmes, excitent en nous la sensation d'une couleur différente de celle que tend à produire leur ensemble, ensorte, par exemple, qu'une surface naturellement blanche nous paraît verdâtre, qu'une autre qui est disposée pour réfléchir la couleur verte agit sur l'œil comme une surface bleue, etc. : on a donné à ces couleurs, qui n'ont lieu qu'en vertu de certaines conditions particulières, le nom de *couleurs accidentelles*, pour les distinguer des cou-

(1) Les bornes que nous sommes obligés de nous prescrire ne nous permettent pas de passer en revue d'autres objections de l'auteur, dont aucune ne nous paraît concluante. Il pense, par exemple, que l'encre étant le résultat d'une combinaison métallique placée dans des circonstances qui annoncent la plus grande compacité, ne devrait pas être noire, puisqu'une substance ne devient noire, que quand ses corpuscules sont réduits au plus grand degré possible de ténuité. La réponse est que la densité ou la compacité d'un corpuscule, et sa dimension en épaisseur sont deux choses distinctes. Ainsi, on parvient à réduire l'or, qui a beaucoup de densité, en lames assez minces pour avoir de la transparence, et nos moyens artificiels ne donnent pas, à beaucoup près, la limite de la division dont ce métal est susceptible. Rien n'empêche donc que les molécules de l'encre ne soient en même temps très-denses et assez atténuées pour paraître noires.

leurs naturelles sous lesquelles les corps s'offrent à nous dans les cas ordinaires.

1031. Le célèbre Buffon est un de ceux qui ait fait le plus de recherches sur les couleurs accidentelles (1). Un exemple suffira pour donner une idée de la manière dont il les faisait paraître. Lorsqu'on regarde fixement et long-temps un petit carré de papier rouge, placé sur un papier blanc, on voit naître autour du petit carré rouge une espèce de bordure d'un vert bleuâtre faible; en cessant de regarder le carré rouge, si l'on porte subitement l'œil sur quelque partie du papier blanc, on y apperçoit un carré teint du même vert-bleuâtre, et cette apparence est plus ou moins durable, suivant que l'impression de la couleur rouge a été plus ou moins forte.

1032. D'autres physiciens, et en particulier M. Le comte de Rumford, et M. Prieur de la Côte-d'Or, qui se sont occupés depuis du même objet, ont employé une manière de faire les expériences, qui en rend les effets beaucoup plus prompts et plus sensibles. Voici en quoi elle consiste. On place entre la lumière et l'œil un morceau de papier, d'étoffe ou de verre qui soit, par exemple, d'une couleur rouge, et on présente une petite bande de carton blanc parallélement à la surface antérieure de la substance colorée, et très-près de cette même surface. Le carton paraît alors d'un vert céladon ou d'un vert bleuâtre, et si on le fait aller et revenir avec vîtesse, en le tenant toujours à une petite distance de la substance colorée, ou même en contact avec elle, sa couleur devient plus intense. On réussira même à voir, dès le premier instant, cette couleur dans toute sa vivacité, en donnant à la substance colorée une certaine position, comme lorsqu'on la tient élevée au-dessus du niveau de l'œil, et un peu inclinée en avant (2).

---

(1) Histoire Naturelle; édit. *in*-12, 1774, Supplément, t. II, p. 309 et suiv.

(2) On peut rendre cette expérience plus piquante, en découpant une carte blanche sous la forme d'un petit arbrisseau, que l'on colle ensuite sur un papier rouge. Si l'on donne à ce papier la position convenable, on verra le petit arbrisseau verdir à l'instant.

1033. La couleur accidentelle de la petite bande blanche varie suivant la couleur naturelle de la substance qui lui sert comme de fond. Ainsi la petite bande placée sur un papier bleu donne l'orangé rougeâtre, sur un papier violet le blanc verdâtre, sur un papier vert le violet rougeâtre, sur un papier jaune le violet bleuâtre, sur un papier orangé le bleuâtre. La plupart de ces diverses teintes sont peu intenses, quoique distinctes, surtout lorsqu'on emploie le mouvement pour les aviver (1).

Les expériences dont il s'agit s'étendent aux cas où la petite bande de carton a elle-même une couleur déterminée, mais différente de celle du fond. Par exemple, une bande d'une couleur verte devient bleue sur un fond jaune; et si elle est d'une couleur orangée, elle deviendra rouge sur le même fond.

1034. Le père Scherffer, savant jésuite, paraît être le premier qui ait entrepris de donner la théorie de ces apparences singulières (2). Le premier pas à faire, pour y parvenir, était de ramener les phénomènes à une règle fondée sur la composition de la lumière, et sur une certaine relation entre les couleurs des deux surfaces, dont l'une sert comme de fond à l'autre. Dans cette vue, le père Scherffer a recours à une construction très-ingénieuse, imaginée par Newton, pour déterminer l'espèce de couleur composée qui doit résulter d'un mélange de couleurs primitives dont les qualités et les quantités relatives sont données (3). Cet illustre géomètre compare les actions des couleurs qui forment le mélange, à celles que plusieurs poids exercent les uns sur les autres, de manière à produire une action unique, dont la direction passe par le centre commun de gravité de tous ces poids. Pour appliquer cette

(1) On conçoit que la nuance de la couleur accidentelle doit varier, suivant que la couleur du fond est plus ou moins pure, plus ou moins intense, etc.

(2) Dissertation sur les couleurs accidentelles; Journal de Physique, ann. 1785, p. 175 et suiv.

(3) *Optice Lucis*, lib. I, pars 2, propos. 6, probl. 2.

idée à la solution du problème dont nous venons de parler, Scherffer divise une circonférence de cercle en sept arcs *ab*, *bd*, *de*, etc. (*fig.* 142), dont les longueurs sont proportionnelles aux espaces qu'occupent sur le spectre solaire les sept couleurs principales qui le composent (1).

1035. D'après cela, veut-on savoir quelle est la couleur composée que doit prendre le mélange des sept couleurs en proportion donnée? Ayant cherché les centres de gravité *m*, *n*, *r*, *s*, *t*, *x*, *z* des sept arcs qui représentent les couleurs du spectre solaire, on tracera autour de ces centres les circonférences d'autant de cercles, dont les surfaces soient dans le rapport des quantités de rayons que les différentes couleurs doivent fournir au mélange, et l'on cherchera le centre de gravité commun de tous ces cercles. Soit *y* ce centre de gravité; si du centre c de la circonférence *age*, on mène par le point *y* un rayon *cyp*, le point *p* de la circonférence sur lequel tombera ce rayon, indiquera l'espèce de couleur que doit offrir le mélange. Si le point *p* coupait l'arc *bd* en deux parties égales, la couleur dont il s'agit serait l'orangé pur; mais comme *p*, dans le cas présent, se rejette du côté de *b*, qui est

(1) Les espaces que les couleurs occupent sur le spectre solaire, en allant du violet au rouge, sont proportionnels aux différences entre les nombres de la série 1, $\frac{8}{9}$, $\frac{5}{6}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{5}$, $\frac{9}{16}$, $\frac{1}{2}$, dont la loi est la même que celle des couleurs des cordes qui rendraient notre gamme dans le mode mineur (948). Scherffer a supposé que l'intensité de la lumière était naturellement uniforme dans toute l'étendue du spectre, ce qui lui a donné pour les rapports entre les arcs qui soudivisent la circonférence, les nombres $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{18}$, $\frac{1}{11}$, $\frac{1}{12}$, $\frac{1}{15}$, $\frac{1}{30}$, $\frac{1}{16}$. Newton suppose que l'intensité de chaque couleur est en raison inverse de la longueur de la corde qui, selon lui, représente cette couleur, et pour ramener toutes les couleurs à des intensités égales, il divise chaque longueur par celle de la corde qui répond à la couleur précédente, et retranche le quotient de l'unité. Ainsi l'arc occupé par le violet étant toujours $1 - \frac{8}{9}$, ou $\frac{1}{9}$, celui qu'occupe l'indigo deviendra $1 - \frac{5}{6}$, ou $\frac{1}{6}$. Dans cette hypothèse, la série

$\frac{8}{9}$

des nombres auxquels les différens arcs sont proportionnels est $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{18}$, $\frac{1}{10}$, $\frac{1}{8}$, $\frac{1}{10}$, $\frac{1}{16}$, $\frac{1}{9}$. L'expérience peut seule décider de la préférence entre ces deux méthodes, qui d'ailleurs doivent être considérées comme simplement approximatives.

la limite du rouge, la couleur sera l'orangé rougeâtre. D'une autre part, en même temps que la position du point *p* indique le ton de la couleur, la position du point *y* en fait connaître l'intensité, qui est d'autant plus forte que ce point se rapproche davantage de la circonférence, et d'autant plus faible qu'il est plus voisin du centre, ensorte que s'il coincidait avec ce dernier point, la couleur tomberait dans le blanc.

1036. La même méthode sert à trouver la couleur mixte que doit produire la réunion d'un nombre donné de couleurs prises parmi les sept couleurs principales, et dont nous supposerons que les quantités relatives soient les mêmes que dans le spectre solaire. Par exemple, si l'on demande quelle est la couleur composée qui doit résulter du mélange des six couleurs suivantes, violet, indigo, bleu, jaune, orangé, rouge, ou de toutes les couleurs moins le vert, la solution du problème se réduit à trouver le centre *k* de gravité de l'arc *fae*, égal à la somme des six arcs qui représentent les couleurs données, et à faire passer par ce centre le rayon *cl*. La position du point *l* indique que la couleur composée que l'on cherche est le violet rougeâtre, et l'on voit que cette couleur doit être faible, à cause de la petite distance entre le point *k* et le centre *c*. On conçoit aisément ce qu'il y aurait à faire, dans le cas de cinq couleurs composantes, ou d'un plus petit nombre. Dans ces derniers cas, les couleurs supprimées produiraient aussi, par leur réunion, une couleur mixte, qu'il est de même facile de déterminer; d'où l'on voit que l'ensemble des couleurs prismatiques peut être divisé de diverses manières en plusieurs parties susceptibles d'offrir tantôt toutes couleurs mixtes, tantôt des couleurs mixtes avec des couleurs simples. Dans le cas où la division ne se fait qu'en deux parties, chacune des deux couleurs résultantes est dite *complémentaire* de l'autre, dénomination introduite par Hassenfratz, qui s'est beaucoup occupé d'expériences sur la lumière colorée.

1037. Maintenant pour être en état de prédire quelle sera la couleur accidentelle que l'œil verra paraître, dans le cas où l'on place une petite bande de papier blanc sur un papier co-

loré, il suffit de savoir que cette bande présente toujours la couleur complémentaire de celle du fond. Ainsi, lorsqu'elle est sur un papier rouge, ou plutôt d'un rouge violet, on la voit d'un vert bleuâtre; et effectivement cette dernière couleur est celle qui résulte du mélange des couleurs prismatiques, à l'exclusion du rouge et du violet. Par la même raison, la petite bande prend une teinte d'orangé rougeâtre sur un fond bleu, une teinte de violet rougeâtre sur un fond vert, etc. On peut, au seul aspect de la figure, juger à peu près de la couleur accidentelle que doit faire naître sur la petite bande la présence de la couleur environnante, en portant l'œil d'abord sur le milieu de l'arc qui appartient à cette couleur, et ensuite sur le point opposé de la circonférence. Ce point indiquera, sinon la nuance, au moins l'espèce de la couleur accidentelle.

1038. Lorsque la petite bande est elle-même colorée, son passage à une couleur différente dépend de ce que celle qui lui est naturelle résulte d'un mélange de plusieurs couleurs, dont l'une est en même temps celle du fond. Ainsi, l'on sait que le vert, tel que l'emploient les arts, se forme de la réunion du jaune et du bleu. Donc si l'on place une petite bande verte sur un fond jaune, elle doit paraître bleue, parceque le bleu n'est autre chose que le vert dont on a soustrait le jaune. Par une raison semblable, une bande orangée doit paraître rouge sur un papier jaune, puisque l'orangé est un composé de rouge et de jaune.

1039. Nous venons de donner la règle à laquelle obéit la sensation que produit le phénomène sur l'organe de la vue. Mais quelle est la cause qui détermine dans l'organe lui-même une disposition conforme à cette règle, et comment une petite bande blanche, placée, par exemple, sur un fond rouge, quoiqu'elle envoie à l'œil tous les rayons qui composent la blancheur, excite-t-elle en lui l'impression du bleu verdâtre, c'est-à-dire de la couleur qu'offrirait réellement la petite bande, si on avait soustrait de la blancheur la partie qui lui est commune avec la couleur du fond?

Scherffer a essayé d'expliquer cette illusion, d'après le prin-

cipe que, si un sens reçoit à la fois deux impressions du même genre, l'une forte et vive, l'autre beaucoup plus faible, celle-ci est comme absorbée par la première, ensorte qu'elle devient imperceptible pour nous. Reprenons l'exemple d'une petite bande blanche placée sur un papier rouge. Nous pouvons considérer la blancheur de cette bande comme étant composée de vert bleuâtre et de rouge. Mais la sensation de la couleur rouge agissant avec beaucoup moins de force que celle de la couleur environnante du même genre, se trouve éclipsée par cette dernière, ensorteque l'œil n'est sensible qu'à l'impression de la couleur verte, qui étant comme étrangère à la couleur du fond, agit sur l'organe avec toute son énergie. Le principe s'applique, comme de lui-même, à tous les autres cas que nous avons cités.

1040. Cette explication, quoique ingénieuse, n'est pas exempte de difficultés. Le célèbre Laplace en a proposé une qui est plus satisfaisante. Elle consiste à supposer qu'il existe dans l'œil une certaine disposition, en vertu de laquelle les rayons rouges compris dans la blancheur de la petite bande, au moment où ils arrivent à cet organe, sont comme attirés par ceux qui forment la couleur rouge prédominante du fond, ensorte que les deux impressions n'en font plus qu'une, et que celle de la couleur verte se trouve en liberté d'agir comme si elle était seule. Suivant cette manière de concevoir les choses, la sensation du rouge décompose celle de la blancheur, et tandis que les actions homogènes s'unissent ensemble, l'action des rayons hétérogènes, qui se trouve dégagée de la combinaison, produit son effet séparément.

Des Rapports entre la Lumière et la Chaleur.

Dans l'exposé que nous allons faire des rapports qui existent, à plusieurs égards, entre la lumière et la chaleur, nous nous bornerons à la considération des faits, sans prétendre en tirer aucune induction sur l'identité des causes. Nous avons cru que cet exposé trouverait ici d'autant plus naturellement sa place que, dans des expériences récentes, on a essayé d'ajouter

à nos connaissances, sur les rapports dont il s'agit, en employant la lumière colorée, comme terme de comparaison.

1041. On sait que les rayons solaires échauffent, en général, les corps exposés à leur action ; mais ils ne les échauffent pas tous au même degré, et Schéele avait saisi, avec la sagacité qui lui était ordinaire, les circonstances qui font varier l'intensité de leur action, et le principe qui sert à expliquer cette diversité. Ce célèbre chimiste ayant exposé à cette même action deux thermomètres égaux, dont l'un était rempli d'alkohol coloré d'un rouge foncé, et l'autre d'alkohol non coloré, observa que la liqueur rouge montait plus rapidement que celle qui était sans couleur ; mais si l'on plongeait les deux thermomètres dans l'eau chaude, les mouvemens de la liqueur étaient les mêmes de part et d'autre. Schéele avait encore remarqué que plus la couleur d'un corps approche du noir, plus aussi ce corps est échauffé promptement par les rayons du soleil ; tandis qu'au contraire les corps les plus blancs sont ceux qui s'échauffent le plus lentement.

1042. On voit ici une analogie marquée entre la lumière et le calorique rayonnant, qui ne devient susceptible d'échauffer un corps, qu'en perdant sa propriété rayonnante, pour prendre, par son union avec ce corps, le caractère de calorique combiné ; et c'est alors seulement qu'il devient sensible au thermomètre (146 et suiv.) De même, tant que le mouvement de la lumière n'est point interrompu, il n'en résulte aucune chaleur proprement dite (1) ; et si ce mouvement ne fait que changer de direction, par l'effet de la réflexion, les rayons qui subissent cet effet ne contribuent point à la production de la chaleur, qui ne dépend que des rayons absorbés. De là vient que les corps qui absorbent en plus grande abondance la lumière, comme les noirs, sont ceux qu'elle échauffe le plus ; elle agit beaucoup plus faiblement pour échauffer les corps blancs, parcequ'ils la réfléchissent.

(1) Schèele, Traité Chimique de l'Air et du Feu, traduit par le baron de Dietrich ; Paris, 1781, p. 146.

1043.

1043. Il y a cependant cette différence entre la lumière et le calorique, que les rayons de la première traversent librement le verre et les liqueurs limpides, tandis que les rayons du calorique restent engagés dans ces mêmes corps auxquels ils communiquent de la chaleur (1).

1044. Le savant physicien Rochon se proposa, en 1775, de rechercher, par l'expérience, si les rayons qui diffèrent en réfrangibilité, produisaient sur le thermomètre des degrés de chaleur sensiblement différens (2). Il se servit d'un prisme de flint-glass, pour séparer les rayons diversement colorés, qu'il faisait passer ensuite tour à tour à travers une lentille. Il observa qu'un thermomètre d'air, exposé à l'action des mêmes rayons, montait à mesure que ceux-ci se succédaient, depuis le violet jusqu'au rouge; et le rapport de chaleur entre le rouge clair et le violet le plus intense lui parut être à peu près celui de 8 à 1. Mais il avouait modestement que, malgré toutes les précautions qu'il avait prises pour mettre de la précision dans ses résultats, il n'était pas encore satisfait de son travail (3).

1045. Le célèbre astronome Herschell, dont le nom rappelle des découvertes si importantes, a entrepris depuis une belle suite d'expériences dirigées vers le même but, et a étendu ses recherches à tout ce qui pouvait être l'objet d'un rapprochement entre les propriétés physiques de la lumière et celles du calorique. Dans les expériences relatives à la chaleur produite par les rayons diversement colorés du spectre solaire, il faisait passer successivement ces rayons par une ouverture pratiquée à un écran, et les recevait sur la boule d'un thermomètre placé derrière cette ouverture. Il conclut de ses observations, que la faculté calorifique des rayons rouges était à celle des rayons violets, à peu près dans le rapport

(1) Bertholet, Statique Chimique, t. I, p. 192.

(2) Essai sur les Degrés de Chaleur des Rayons colorés; Recueil de Mém. sur la Mécanique et la Physique, p. 348 et suiv.

(3) *Ibid.*, p. 355.

de 7 à 2, beaucoup plus petit que celui auquel était parvenu le physicien français (1).

1046. M. Leslie a repris depuis les mêmes expériences, en se servant d'un instrument très-sensible qu'il nomme *photomètre* (mesure de la lumière), et dont la construction se rapproche de celle du thermomètre différentiel (163), déjà employé si avantageusement par le même physicien, pour observer les effets du calorique rayonnant. La pièce essentielle du photomètre consiste de même dans un tube de verre qui imite un siphon renversé, dont les deux branches seraient égales en hauteur et terminées par des boules d'un égal diamètre. Mais ici l'une des boules est d'émail noir, tandis que l'autre est de verre ordinaire. Les mouvemens de la liqueur, qui est aussi l'acide sulfuriqne teint en rouge avec du carmin, se mesurent à l'aide d'une graduation dont le zéro est situé vers le haut de la branche terminée par la boule d'émail.

1047. L'usage de cet instrument est fondé sur le principe que quand la lumière est absorbée par un corps, elle produit une chaleur proportionnelle à la quantité de l'absorption. Lorsqu'on expose l'instrument aux rayons du soleil, ceux de ces mêmes rayons qu'absorbe la boule de couleur noire, échauffent l'air intérieur, ce qui détermine la liqueur à descendre d'abord avec rapidité dans la branche correspondante. Mais comme une partie de la chaleur qui s'introduit à la faveur de l'absorption se dissipe par le rayonnement, et que la différence entre la quantité de chaleur perdue et celle de chaleur acquise va toujours en diminuant, il arrive un terme où ces deux quantités étant devenues égales, l'instrument est stationnaire, et l'on juge alors de l'intensité de la lumière incidente par le nombre de degrés que la liqueur a parcourus.

1048. L'auteur de cet ingénieux instrument en indique les avantages, pour déterminer l'accroissement progressif que subit l'intensité de la lumière, et la gradation en sens con-

(1) Bibliothèque Britannique, t. XV, p. 196 et suiv.

traire qui succède à ce progrès, soit depuis la naissance du jour jusqu'au terme de son déclin, soit depuis le solstice d'hiver jusqu'à la fin de l'automne suivant. On pourrait encore comparer, à l'aide du même instrument, l'action de la lumière dans les différentes contrées, dont les unes jouissent assez constamment d'un ciel pur et serein, tandis que pour d'autres il semble être couvert d'un voile qui en offusque l'éclat.

1049. M. Leslie s'étant proposé, comme nous l'avons dit, de mesurer l'énergie des rayons diversement colorés qui composent le spectre solaire, a fait passer un jet de lumière à travers un prisme de flint-glass, et les indications du photomètre présenté successivement aux différentes parties du spectre, ont donné à peu près, pour le rapport entre les degrés de force des rayons bleus, verts, jaunes et rouges, celui des nombres 1, 4, 9, 16; rapport qui, considéré dans les deux termes extrêmes, est double de celui que M. Rochon avait déduit de ses expériences, et plus que quadruple de celui que M. Herschell avait substitué au précédent.

1050. Le célèbre astronome anglais conçut aussi l'idée de comparer les rayons du spectre relativement à leur force éclairante, et il jugea que le rouge, qui terminait d'un côté le prisme, était surpassé par le jaune, dans lequel résidait le *maximum* de clarté; que le vert éclairait à peu près aussi bien, et qu'ensuite il y avait une dégradation sensible jusqu'au violet, qui donnait le *minimum* de clarté (1). Ces résultats diffèrent peu de ceux que Newton avait annoncés longtemps auparavant (2).

1051. Le même astronome essaya de vérifier une conjecture qui s'était offerte à lui dans le cours de ses recherches précédentes; savoir, qu'il existait, hors des limites du spectre solaire, des rayons soumis aussi à la loi de la réfrangibilité,

(1) Bibliothèque Britannique, t. XV, p. 200 et suiv.

(2) *Optica Lucis*, lib. I, pars 1, propos. 7, exper. 16.

mais non-lumineux et simplement calorifiques. La conclusion qu'il tira de ses expériences fut que la faculté d'échauffer avait les mêmes limites que le spectre, du côté du violet; qu'elle augmentait progressivement depuis le violet jusqu'au rouge, et ensuite au-delà du rouge, où elle résidait dans des rayons insensibles à l'œil et moins réfrangibles que tous ceux qui étaient lumineux, ensorte que son *maximum* répondait environ à un demi-pouce en dehors des rayons rouges (1). D'après l'hypothèse à laquelle conduisent les expériences dont il s'agit, les émanations du soleil consisteraient dans des rayons de deux natures différentes; les uns seraient simplement lumineux, et les autres simplement calorifiques : il en résulterait deux spectres, qui se confondraient en grande partie, de manière que celui qui est produit par les rayons lumineux serait dépassé par l'autre, du côté du rouge; et la chaleur qui accompagne la lumière dépendrait d'un mélange de rayons calorifiques (2).

1052. Ces expériences étaient assez intéressantes pour mériter d'être soigneusement vérifiées, et assez délicates pour en avoir besoin. M. Leslie appelé, en quelque sorte, à faire cette vérification, y ayant apporté toutes les attentions les plus propres à la rendre décisive, n'a pu appercevoir aucun indice de chaleur au-delà des limites du spectre solaire, et il y a tout lieu de présumer que l'effet annoncé par M. Herschell était dû à l'influence étrangère de quelque cause accidentelle. Cette conséquence est d'ailleurs conforme à l'analogie; car, dans le cas présent où le calorique serait à l'état de fluide rayonnant, et agirait indépendamment du fluide lumineux, il devrait rester engagé dans le prisme (1043), au lieu d'être transmis par la réfraction, pour aller ensuite exercer son impression sur le plan qui recevrait ses rayons avec ceux de la lumière solaire.

---

(1) Bibliothèque Britannique, t. XV, p. 217 et suiv.

(2) *Ibid.* p. 293 et suiv. *Voyez* aussi t. XIX, p. 19 et suiv.

4. De la Vision naturelle.

1053. Nous avons considéré successivement la lumière comme lancée par les corps dont elle est une émanation, traversant ensuite l'espace avec une rapidité inconcevable et pourtant susceptible d'être mesurée, reçue enfin par les surfaces des corps, dont les unes la réfléchissent, tandis que les autres la transmettent; et l'étude des diverses modifications qu'elle reçoit, suivant les différentes manières dont ces corps agissent sur elle, nous a dévoilé les causes de la transparence, de l'opacité et des couleurs.

Les impressions que les objets excitent à leur tour dans l'organe de la vue, et qui nous en font distinguer les différens états, dépendent d'une action immédiate qu'exerce sur cet organe la lumière qu'ils lui envoient, soit qu'elle vienne immédiatement d'un corps lumineux, soit qu'elle ait été réfléchie par la surface d'un miroir ou d'un corps opaque, soit enfin qu'elle ait passé à travers un corps transparent.

Notre but sera maintenant de considérer en quoi consiste cette action, de tracer la marche que suivent dans l'organe les rayons envoyés par les objets, et d'exposer les résultats des différentes recherches faites par les physiciens, sur la manière dont s'opère la vision; et pour commencer par ce qu'il y a de plus simple, nous supposerons d'abord qu'il n'existe, entre l'œil et les objets, aucun intermédiaire qui modifie l'action de la lumière.

De la Structure de l'Œil.

1054. Les anciens philosophes n'avaient, relativement à la manière dont la vision s'opère, que des idées imparfaites; ils savaient seulement, en général, que les yeux en sont les instrumens; et cependant les traits de sagesse et de prévoyance répandus sur le peu qu'ils en connaissaient ne leur avaient

pas échappé (1) ; ils admiraient la position de l'œil dans le lieu le plus élevé de la tête, d'où, comme une sentinelle, il embrassait dans un seul regard une multitude d'objets ; son extrême mobilité, et cette facilité qu'il a de se diriger en tout sens, et de se multiplier, en quelque sorte, par la variété de ses situations ; la souplesse des paupières toujours prêtes à s'abaisser comme un voile pour le défendre, soit de l'impression d'une lumière trop vive, soit du choc d'un corps extérieur, ou pour favoriser la puissance du sommeil sur l'ensemble de tous les organes. Mais ces observations, et d'autres du même genre, se bornaient aux alentours de l'œil ; on n'avait pas pénétré dans le mécanisme intime de la vision. On a reconnu depuis que cet organe est un véritable instrument d'optique, au fond duquel la lumière va dessiner, ou plutôt peindre les portraits en petit de tous les corps situés en présence du spectateur ; et l'on peut dire que parmi tant de sujets d'observation que la nature présente à l'œil de toutes parts, il ne voit rien qui porte plus sensiblement l'empreinte d'une Intelligence infinie que la structure de l'œil lui-même.

1055. Entrons dans les détails, et commençons par une description de l'œil, qui serait imparfaite de la part d'un anatomiste, mais qui suffit au physicien, pour prendre une idée des effets de la vision.

La cavité dans laquelle l'œil est logé se nomme *l'orbite de l'œil*. Les nerfs optiques qui, séparés en partant du cerveau, s'étaient ensuite réunis en un point commun, se séparent de nouveau, et chacun d'eux entre dans l'orbite placée de son côté, où il s'épanouit pour former le globe de l'œil, ensorte que les enveloppes de ce globe ne sont autre chose que les expansions du nerf optique.

On distingue, dans ce nerf, deux tuniques principales, situées l'une sur l'autre autour de la partie médullaire. La tunique extérieure, qu'on appelle la *dure-mère*, prend, en s'épanouissant, une forme arrondie, dont la partie anté-

(1) *Cicero*, de *Nat. Deor.*, t. II, n. 141 et seq.

rieure, qui est à découvert, représente à peu près un segment de sphère d'un diamètre plus petit que celui de la partie enfoncée dans la cavité de l'œil, ce qui la rend saillante et plus propre à recevoir les rayons qui viennent de côté.

De ces deux portions de sphère, celle qui occupe le fond de la cavité est opaque et d'une forte consistance; on la nomme *sclérotique* ou *cornée opaque;* l'autre portion, qui forme la partie antérieure, est plus mince, plus flexible, et en même temps diaphane, d'où lui vient le nom de *cornée transparente.* La seconde tunique du nerf optique qui s'appelle la *pie-mère*, s'épanouit en dessous de la dure-mère : elle est composée de deux lames, dont l'une, qui est une véritable membrane, s'applique exactement sur la cornée opaque, et se confond avec elle près de la cornée transparente; l'autre, qu'on nomme *choroïde*, est un assemblage de nerfs et de vaisseaux qui sortent de la surface interne de la première, et qui sont imbibés d'une espèce de liqueur noirâtre. Ces nerfs et ces vaisseaux s'ouvrent en partie et forment ce tissu velouté dont Ruysch a fait une tunique particulière, à laquelle on a donné son nom.

Vers l'endroit où la cornée transparente s'unit à la sclérotique, la choroïde se détache, et de plus se soudivise en deux lames, dont celle qui est antérieure produit cette espèce de couronne colorée qu'on appelle l'*iris*, vers le milieu de laquelle est une ouverture ronde connue sous le nom de *prunelle.* La lame postérieure, qu'on nomme *couronne ciliaire*, est plissée et comme composée de feuillets oblongs, dont nous verrons bientôt l'usage.

L'iris est un assemblage de fibres musculaires, les unes orbiculaires et rangées autour de la circonférence de la prunelle, les autres dirigées comme autant de rayons. Les premières servent à rétrécir la prunelle, pour modérer l'impression d'une lumière trop vive, et les autres à la dilater, pour laisser entrer avec plus d'abondance une lumière faible.

Les couleurs les plus ordinaires de l'iris sont l'orangé et le bleu, et souvent ces couleurs se trouvent mélangées dans un

même œil. Les yeux qu'on appelle *noirs* sont d'un jaune brun, ou d'un orangé très-foncé.

La couronne ciliaire tient comme enchâssé, vis-à-vis le trou de la prunelle, un corps transparent, assez solide, d'une forme lenticulaire, et plus convexe vers le fond de l'œil que par devant : ce corps porte le nom de *cristallin*.

La portion médullaire du nerf optique forme, en s'épanouissant, une membrane blanche et très-mince, appliquée sur la choroïde, et qu'on appelle *rétine*.

L'espace compris entre la cornée transparente et le cristallin se trouve divisé par l'iris en deux espèces de chambres, qui communiquent ensemble au moyen de la prunelle, et qui sont remplies d'une eau limpide, appelée l'*humeur aqueuse*. Entre le cristallin et le fond de l'œil, est un autre espace beaucoup plus grand, occupé par une sorte de gelée transparente, qui est l'*humeur vitrée*. Le cristallin est comme enchatoné dans la partie antérieure de cette gelée, dont la puissance réfractive est moindre que la sienne.

Ce qu'on appelle le *blanc de l'œil* est produit par une tunique particulière, qu'on nomme *albuginée*, et qui adhère fortement à la cornée ; elle est recouverte par une autre membrane, très-mince, lâche et flexible, appelée *conjonctive*, qui se replie au bord de l'orbite et forme la surface interne des paupières. Celle-ci est percée d'une multitude de petits trous, par lesquels passe le fluide qui vient de la glande lacrymale.

L'œil a été pourvu de différens muscles destinés à l'avancer ou à le retirer en arrière, à en élargir ou à en resserrer l'ouverture, et à lui procurer une multitude de positions variées, pour le mettre à portée d'appercevoir distinctement les objets situés à différentes distances.

De la Marche des Rayons dans l'Œil.

1056. De tous les points d'un objet qui se présente à l'œil, il part des rayons qui divergent dans tous les sens, mais parmi

lesquels ceux qui sont dirigés de manière à pouvoir entrer dans la petite ouverture de la prunelle, forment des espèces de pinceaux déliés, ensorte que ceux qui composent un même pinceau approchent du parallélisme. Supposons que l'objet étant d'une forme alongée, soit situé horizontalement, et ne considérons, pour plus de simplicité, que le pinceau qui vient du milieu, et les deux qui viennent des extrémités. L'axe du premier pinceau passant par le centre de la cornée, et tombant à angle droit sur la surface du cristallin, pénètre les différentes humeurs de l'œil, sans y subir de réfraction. Cet axe porte le nom d'*axe optique*, et est d'un grand usage dans l'explication des phénomènes de la vision. Les autres rayons qui tombent obliquement sur la cornée se réfractent dans l'humeur aqueuse, en convergeant vers l'axe. Leur passage à travers le cristallin augmente cette convergence ; et en sortant de ce corps lenticulaire pour entrer dans un milieu moins dense, ils prennent un nouveau degré de convergence qui est tel, que le cône qu'ils forment derrière le cristallin a son sommet situé précisément sur le fond de l'œil, où il dessine l'image du point d'où les rayons sont partis pour se rendre à cet organe. Cette marche des rayons est analogue à celle dont nous avons parlé (881), en exposant les effets de la réfraction dans les milieux terminés par des surfaces courbes.

Les axes des deux autres pinceaux en entrant par la cornée se réfractent ainsi que les rayons qui les accompagnent : ces pinceaux se croisent ensuite en passant par le trou de la prunelle, et subissent dans le cristallin et l'humeur vitrée de nouvelles réfractions, dont l'effet est de rapprocher les rayons qui les composent de leurs axes respectifs, ensorte qu'ils forment deux nouveaux cônes dont les bases reposent sur la surface postérieure du cristallin, et dont les sommets tombent sur le fond de l'œil, où ils dessinent de même les images des points qui leur correspondent sur l'objet.

Tous les pinceaux partis des autres points de l'objet font le même office, ensorte qu'il se forme au fond de l'œil une image complète de cet objet, mais qui est renversée, en conséquence

de ce que les rayons qui viennent des points situés de part et d'autre de celui du milieu, se croisent en traversant la prunelle. L'opinion la plus commune est que l'image se peint sur la rétine : cependant, de célèbres anatomistes ont pensé que la choroïde était la véritable toile du tableau (1).

1057. On peut vérifier, par l'expérience, ce que nous venons de dire sur la cause de la vision, en prenant l'œil d'un bœuf tué récemment, et en le dépouillant par derrière de sa sclérotique. Si l'on place cet œil dans l'ouverture faite au volet d'une chambre obscure, de manière que la cornée soit en dehors, on verra, à travers les membranes transparentes de la partie opposée, les images distinctes des objets extérieurs.

Manière dont le Sens du Toucher influe sur la Vision.

1058. Cette vérité une fois reconnue, qu'aussitôt qu'un objet est devant l'œil, cet objet a son portrait au fond de l'organe, il semble d'abord que la vision n'ait plus besoin d'autre explication ; et l'on serait tenté de croire que nos yeux, à l'instant où ils s'ouvrent pour la première fois, sont déjà tout dressés, et que la seule présence des objets suffit pour que les impressions faites sur la rétine, et transmises par l'intermède du nerf optique jusqu'au cerveau, donnent occasion à l'ame de se représenter ces objets tels qu'ils sont, et aux endroits où ils sont. Mais on concevra qu'il faut quelque chose de plus, si l'on fait attention que l'image qui se peint sur la rétine est une simple surface figurée et revêtue de couleurs, sans aucuns reliefs, et que d'ailleurs elle n'est que le résultat de l'action qu'exercent sur l'organe les extrémités des rayons qui le touchent, et ne se rapporte pas d'elle-même aux extrémités opposées, où se trouve situé le corps qui est l'objet de

(1) Smith, Traité d'Optique, p. 44, notes 31 et suiv.

la vision. Ces considérations avaient déjà fait conjecturer à plusieurs physiciens, qu'il existait un intermédiaire qui nous servait à lier les impressions produites par les rayons que les corps envoient à l'œil avec les modifications de ces corps eux-mêmes. Ils pensaient que c'était le tact qui instruisait l'œil en quelque sorte, et qui nous aidait à rectifier les erreurs dans lesquelles cet organe nous entraînerait, s'il était abandonné à lui-même. Mais personne n'a mieux développé que Condillac (1), les moyens que le tact emploie dans cette espèce d'enseignement, et c'est en partie d'après ce célèbre métaphysicien que nous allons essayer de les faire connaître.

1059. Les premières leçons nous viennent des divers mouvemens que fait la main, qui a elle-même son image au fond de l'œil. Tandis qu'elle s'approche et s'éloigne successivement de cet organe, elle lui apprend à rapporter à une distance plus ou moins grande, à un lieu plutôt qu'à l'autre, l'impression qui se produit sur la rétine, d'après le sentiment que nous avons de chaque position de la main, de la direction et de la grandeur de chaque mouvement qu'elle fait. Tandis qu'une main passe sur l'autre, elle étend, en quelque sorte, sur la surface de celle-ci, la couleur dont l'impression est dans l'œil ; elle circonscrit cette couleur entre ses limites, et fait naître dans l'ame la représentation d'un corps figuré de telle manière. Lorsqu'ensuite nous touchons différens objets, la main dirige l'œil sur les diverses parties de chacun d'eux, et lui en rend sensibles l'arrangement et les positions respectives ; elle agit sans cesse, à l'égard de l'œil, par l'intermède des rayons de la lumière, comme si elle tenait une des extrémités d'un bâton qui aboutirait au fond de l'œil par l'autre extrémité, et qu'elle conduisît successivement ce bâton sur tous les points de l'objet. Elle semble avertir l'œil que le point qu'elle touche est l'extrémité du rayon qui le frappe. Elle parcourt ainsi toute la surface de l'objet ; elle semble en prononcer la véritable figure. Tantôt courbée uniformément sur la surface

(1) Traité des Sensations.

d'un globe dont elle suit le contour dans tous les sens, elle marque la distinction de la lumière et des ombres, elle donne de la rondeur et du relief à ce que l'œil apperçoit. Tantôt obligée de varier sa propre figure, tandis qu'elle se moule alternativement sur les faces et sur les arêtes d'un corps anguleux, elle fait ressortir les diverses positions et l'assortiment des plans qui en composent la surface.

Dès qu'une fois les yeux sont instruits, alors l'expérience qu'ils ont acquise les met dans le cas de se passer des secours du tact; et la seule présence des objets détermine le retour des mêmes sensations, à l'occasion des impressions semblables que font sur l'organe les rayons envoyés par ces objets.

1060. Nous avons dit (1056) que l'image de chaque objet se peint au fond de l'œil dans une situation renversée, et des savans célèbres en ont conclu que chacun voyait naturellement tous les objets dans cette même situation; mais il sera aisé de sentir combien cette conséquence est peu fondée, si l'on considère que nous voyons notre propre corps, qui a son image renversée sur la rétine, comme celle des autres objets, ensorte que le seul sentiment que nous avons de notre position, détermine la sensation qui nous fait voir tous les objets droits.

1061. En même temps que le tact instruit l'œil à rapporter au dehors les images des objets, et à en saisir les formes, il l'exerce sur l'estimation de leur position dans l'espace, de leurs grandeurs et de leurs distances; et lorsque ces distances surpassent celles jusqu'où s'étendent les mouvemens de la main, nous y suppléons par un autre exercice, qui consiste à nous approcher de l'objet jusqu'au point de le toucher, et à nous en éloigner ensuite, et nous jugeons à peu près de sa distance par l'étendue des mouvemens que nous faisons vers lui, ou en sens contraire. Lorsqu'ensuite la distance surpasse la portée de nos mouvemens ordinaires, les rapports que nous sommes exercés à saisir nous servent comme de règles pour appliquer à des objets plus éloignés les impressions qui se font en nous; mais à mesure que l'éloignement augmente, les circonstances deviennent toujours moins favorables à ces applications; et au-delà

d'un certain terme, les objets se présentent à nous sous des apparences plus ou moins trompeuses, qui nous induisent dans ces espèces d'erreurs que l'on a nommées *illusions d'optique*, et dont nous parlerons dans la suite. Donnons un nouveau développement à ce sujet intéressant, et essayons de suivre l'œil depuis les espaces où il est dirigé par une sorte de souvenir des leçons qu'il a reçues du tact, jusqu'aux vastes régions qu'il franchit, bien au-delà du cercle qu'il a parcouru avec son guide.

Estimation de la Distance.

1062. Lorsque nous regardons un objet, il y a toujours un point de cet objet que nous fixons plus particulièrement que les autres, et vers lequel se dirigent les deux axes optiques, ensorte que ce même point devient le sommet de l'angle qu'ils forment entre eux. A mesure qu'un objet s'approche ou s'éloigne de nous, ou, ce qui revient au même, à mesure que nous avançons vers cet objet, ou que nous nous en écartons, les yeux font des mouvemens continuels pour varier leur figure et leur position, de manière à ce que les deux axes optiques coincident toujours sur un même point de l'objet. Lorsque les distances dont il s'agit sont de celles que nous pouvons mesurer par les mouvemens de la main, ou en allant toucher l'objet, le sentiment que nous avons des mouvemens que font en même temps nos yeux pour se diriger vers l'objet, nous fait contracter l'habitude de juger des distances d'après les impressions qui sont liées à ces mouvemens, et en même temps d'estimer la position de l'objet (1); de là vient que la main va droit à l'objet qui est à sa portée, et que nous voulons toucher ou saisir. Nous parvenons encore à frapper sûrement, avec l'extrémité d'un bâton que nous avons à la main, un objet situé à une certaine distance; mais dès que nous n'employons plus qu'un œil pour fixer l'objet, alors le point de concours des deux

(1) Mallebranche, Recherche de la Vérité, t. I, pp. 115 et 119.

axes optiques n'ayant plus lieu, il nous est beaucoup plus difficile de juger de la position de l'objet, comme on peut s'en assurer à l'aide de l'expérience suivante (1). On suspend un anneau à la hauteur de l'œil, par le moyen d'un fil délié, de manière que l'on ne puisse en voir l'ouverture. On prend un bâton long d'un mètre, à l'extrémité duquel on attache transversalement un autre bâton plus petit : alors fermant un œil, on essaie d'enfiler l'anneau avec le petit bâton, et c'est presque toujours inutilement. Que l'on se serve des deux yeux, et l'on réussira dès la première tentative.

1063. C'est en conséquence de ce que chacun des axes optiques est toujours exactement dirigé vers le point de l'objet que nous fixons de préférence, que quand nous n'avons besoin, relativement à cet objet, que d'un simple alignement, comme quand le chasseur vise l'animal sur lequel il veut tirer, nous fermons un œil, pour mieux estimer la direction sur laquelle se trouve l'objet.

Unité de l'Impression produite dans les deux Yeux.

1064. Quoique chacun des objets situés devant nos yeux ait son image dans l'un et l'autre de ces organes, cependant nous ne voyons pas les objets doubles, parcequ'ayant reconnu, à l'aide du toucher, que tel objet était simple, en même temps que nous dirigions vers lui les deux axes optiques, et que ses deux images se peignaient sur des parties correspondantes des rétines, nous avons lié l'idée de l'unité d'objet avec le sentiment des mêmes impressions, et nous nous sommes accoutumés à identifier deux sensations qui se trouvaient pour ainsi dire à l'unisson l'une de l'autre. Mais si les axes optiques ne concourent plus vers un même point, comme lorsque nous pressons légérement un œil de côté, avec la main, l'objet

(1) Musschenbrock, Essai de Physique, t. II, p. 568, N° 1211.

paraît double, et il est évident qu'alors les deux images ne tombent plus sur des parties correspondantes des rétines (1).

Estimation de la Grandeur.

1065. Il y a un autre angle dont la considération est importante relativement aux phénomènes de la vision. Il est formé par les deux rayons qui, en partant des extrémités de l'objet, viennent se croiser dans la prunelle : on l'appelle *angle visuel.*

Derrière cet angle il s'en forme un second, qui provient des mêmes rayons réfractés à travers le cristallin et les autres humeurs de l'œil ; cet angle sous-tend le diamètre de l'image sur le fond de l'œil, et il est facile de voir qu'il augmente et diminue en même temps que le premier ; et lorsque l'un et l'autre sont petits, les augmentations et les diminutions, ainsi que celles du diamètre de l'image, sont sensiblement en raison inverse des distances de l'objet à l'œil.

1066. Maintenant la grandeur d'un objet peut être conçue sous plusieurs rapports différens. Les véritables dimensions de l'objet, considéré en lui-même, donnent ce qu'on appelle *la grandeur réelle*, et l'ouverture de l'angle visuel détermine *la grandeur apparente ;* d'où l'on voit que la grandeur réelle étant une quantité constante, la grandeur apparente varie continuellement avec la distance.

1067. Si nous jugions toujours des dimensions d'un objet d'après sa grandeur apparente, tout ce qui est autour de nous

(1) On peut produire une illusion du même genre, qui ait sa source dans le sens du toucher. Si l'on fait croiser l'index par le doigt suivant, ensorte que celui-ci se rabatte vers le pouce, et qu'ayant placé un petit corps globuleux sous les extrémités des mêmes doigts, on le presse pour le mettre plus exactement en contact avec l'une et l'autre, on croira sentir deux globes. Dans ce cas, le doigt qui a été dérangé de sa position naturelle exerce une action qui, n'étant plus d'accord avec celle de l'autre doigt, donne naissance à une sensation qui semble se rapporter à un nouvel objet. On pourrait dire, en quelque sorte, que celui qui fait cette expérience, louche des doigts.

subirait continuellement à cet égard des variations très-sensibles, qui nous entraîneraient dans d'étranges méprises. Par exemple, un géant de vingt-quatre décimètres, vu à la distance de quatre mètres, ne nous paraîtrait pas plus grand qu'un nain de six décimètres vu à la distance d'un mètre, puisque l'un et l'autre seraient vus à peu près sous le même angle.

Mais les expériences que nous avons faites avec le secours du tact, sur la comparaison des distances et des grandeurs, nous ont mis à portée de redresser nos idées, dans les circonstances où nous sommes le plus intéressés à éviter la méprise, c'est-à-dire, dans celles où il s'agit des objets qui sont à notre proximité; car alors la distance dont nous jugeons assez exactement, entre comme donnée dans notre estimation, et nous empêche de nous en laisser imposer par l'idée fausse qui résulterait de la considération isolée des grandeurs.

Ainsi les diverses positions des yeux, analogues à la variation des angles formés par les axes optiques, à mesure que les objets sont plus près ou plus éloignés, reproduisent en nous l'impression de la distance, telle que le tact nous a appris à l'estimer; et cette impression se compose avec celle de la grandeur apparente, ou de l'étendue que l'image occupe au fond de l'organe, ensorte que la sensation qui nous représente la grandeur réelle est comme le produit de ces deux élémens. Par exemple, lorsqu'un géant de vingt-quatre décimètres, qui était d'abord à deux mètres de distance, se transporte à quatre mètres, d'une part son image est diminuée de moitié au fond de nos yeux; mais, d'une autre part, la distance se trouve doublée, et l'espèce de combinaison qui se fait en nous des deux impressions relatives, l'une à la grandeur et l'autre à la distance, qui répondent à chaque position du géant, équivaut, pour ainsi dire, au produit constant de deux quantités, dont l'une augmente à proportion que l'autre diminue; d'où il résulte que le géant nous paraît toujours de la même taille.

1068. Nous conclurons encore de ce qui vient d'être dit, que quand deux objets inégaux sont placés à la même distance, nous

nous jugeons de leurs grandeurs respectives d'après le rapport entre les angles visuels relatifs à l'un et à l'autre, ou entre les grandeurs de leurs images au fond de l'œil; car alors les deux produits qui résultent de l'impression de la distance combinée avec celle de la grandeur, ont une quantité commune, savoir, la première impression, à laquelle on peut substituer l'unité, ensorte qu'ils sont proportionnels à l'autre quantité, qui est l'impression de la grandeur.

Jugemens relatifs aux Objets éloignés.

1069. Tant que les objets sont assez peu éloignés, pour que les angles formés par les axes optiques aient une ouverture sensible, qui pérmette de les comparer, les mouvemens de nos yeux, relatifs à ces angles, nous aident encore à nous représenter, avec une certaine justesse, les distances, et en même temps les grandeurs dont l'estimation tient en partie à celle des distances; mais lorsque l'éloignement des objets rend les mêmes angles si petits, qu'ils échappent à la comparaison, les grandeurs jugées dépendent beaucoup des grandeurs apparentes: ainsi un objet situé à une distance considérable, nous paraît beaucoup plus petit qu'il ne l'est réellement.

1070. Le plus ou le moins de clarté des objets, et la manière plus ou moins nette et distincte dont nous les appercevons, nous les fait juger encore ou plus proches ou plus éloignés. C'est en se dirigeant d'après ce principe et le précédent, que les peintres diminuent les dimensions des figures, à proportion que les objets qu'elles représentent sont censés être dans un plus grand éloignement, et qu'ils en expriment en même temps les contours par des teintes plus faibles, ou même ébauchent si légérement ces contours, qu'ils paraissent se perdre dans la couleur du fond, lorsque la distance est supposée très-considérable.

Enfin, lorsqu'entre un objet et nous il se trouve plusieurs autres objets, cette nouvelle circonstance nous aide encore à estimer la distance du premier objet, par une sorte d'addition

que nous faisons de toutes les distances des objets intermédiaires, pour en composer une distance totale ; d'où il résulte qu'alors un objet nous paraît plus éloigné que dans le cas où l'espace qui nous en sépare serait nu, et sans aucun point de ralliement qui pût nous servir à sommer toutes les parties de la distance.

Exemples à l'appui des considérations précédentes.

1071. Pour confirmer tout ce que nous venons de dire au sujet de la vision, nous ajouterons ici un ou deux exemples qui prouvent à quel point l'œil est neuf dans l'art de voir, lorsqu'il donne accès à la lumière pour la première fois. Un jeune homme âgé de 13 ans, auquel M. Chesselden venait de faire l'opération de la cataracte (1), fut d'abord si éloigné de pouvoir juger en aucune manière des distances, qu'il croyait que tous les objets indifféremment touchaient ses yeux (ce fut l'expression dont il se servit) comme les choses qu'il palpait touchaient sa peau. Les objets qu'il trouvait les plus agréables étaient ceux dont la surface est unie et la forme régulière, quoiqu'il ne pût encore porter aucun jugement sur leur forme, ni dire pourquoi ils avaient pour lui plus d'attrait que les autres. Il se passa plus de deux mois avant qu'il pût reconnaître que les tableaux représentaient des corps solides ; jusqu'alors il ne les avait considérés que comme des plans diversement colorés ; mais lorsqu'il commença à distinguer les reliefs des figures, il s'attendait à trouver en effet des corps solides en touchant la toile, et il fut très-étonné lorsque, en passant la main sur les parties qui, par la distribution de la lumière et des ombres, lui paraissaient rondes et inégales, il les trouva planes et unies comme le reste : il demandait quel

(1) La cataracte est une privation de la vue, occasionnée par l'opacité du cristallin. Pour rendre au malade la faculté de voir, on déplace le cristallin en l'abaissant ou en l'extrayant.

était donc le sens qui le trompait, si c'était la vue ou le toucher. On lui montra le portrait en miniature de son père, qui était peint sur la boîte de la montre que portait sa mère, et il dit qu'il reconnaissait bien l'image de son père ; mais il demandait, avec un grand étonnement, comment il était possible qu'un visage aussi large pût tenir dans un si petit espace, que cela lui paraissait aussi impossible que de faire tenir un muid dans une pinte (1).

1072. La même opération faite par M. Grant à un aveugle âgé de vingt ans, a été suivie de circonstances semblables. Lorsque les yeux de ce jeune homme furent frappés, pour la première fois, des rayons de la lumière, on vit sur toute sa personne l'expression d'un ravissement extraordinaire. L'opérateur était devant lui avec ses instrumens à la main : le jeune homme l'examina depuis la tête jusqu'aux pieds ; il s'examinait ensuite lui-même, et semblait comparer sa propre figure avec celle qu'il avait devant les yeux ; tout lui paraissait semblable, excepté les mains, parcequ'il prenait les instrumens du chirurgien pour des parties de ses mains. Il voulut faire un pas, et parut effrayé de ce qui était autour de lui. Il ne pouvait accorder les sensations qu'il éprouvait par la vue, avec celles que les mêmes objets avaient produites en lui par l'intermède du tact, et ce ne fut que par degrés qu'il parvint à distinguer et à reconnaître les formes, les couleurs et les distances (2).

Des Illusions d'Optique.

1073. Nous avons déjà eu occasion de parler des erreurs dans lesquelles nos yeux nous entraînent lorsque les objets sont hors du cercle de nos observations ordinaires, et nous avons vu que, dans ce cas, nous nous trompons également sur les grandeurs et les distances. Une autre cause qui contribue

(1) *Philosophic. Transact.*, N° 402.

(2) Gazette Littéraire de l'Europe ; 21 mars 1764.

encore à nous en imposer, est la diversité des positions que prennent les corps à notre égard, par une suite des mouvemens qui les transportent dans l'espace, ou de ceux que nous faisons nous-mêmes. Les circonstances qui déterminent ces erreurs, que l'on a nommées *illusions d'optique*, sont extrêmement variées ; la sphère qui les embrasse est immense ; elles s'étendent jusqu'aux vastes corps qui se meuvent dans les espaces célestes, et l'hypothèse relative à leur influence sur la manière dont plusiens phénomènes planétaires s'offrent à notre observation, est devenue la base d'une théorie qui ramène à une heureuse simplicité ces phénomènes si embarrassans pour ceux qui voulaient voir des réalités dans de pures apparences. Nous allons donner l'explication de certaines illusions choisies parmi celles qui nous sont le plus familières, ou qui méritent le mieux d'être remarquées.

Illusions produites par des Objets immobiles.

1074. Il n'est personne qui, étant à l'une des extrémités d'une longue avenue, n'ait observé que les deux rangées d'arbres dont elle est composée paraissent converger l'une vers l'autre, au point de se toucher, si l'avenue s'étend assez loin pour cela ; dans ce cas, les intervalles entre deux arbres correspondans sous-tendent des angles visuels qui vont toujours en diminuant, et finissent par être insensibles à une grande distance. Il en résulte que, sur le petit tableau qui est au fond de l'œil, les images des arbres sont situées sur deux lignes inclinées entre elles, et qui concourent en un point commun, ou, ce qui revient au même, les intervalles entre les images des arbres correspondans diminuent graduellement, de manière que le dernier intervalle est presque nul. Or, si nous supposons que les deux axes optiques se dirigent successivement vers différens arbres toujours plus éloignés, la variation de ces angles, et en même temps celle de l'impression de la distance, deviendra toujours moins sensible ; et, par une suite

nécessaire, l'impression de la grandeur, qui dépend ici de l'intervalle entre les arbres correspondans, sera tellement prédominante, qu'elle déterminera presque seule le type de la sensation; ensorte que deux lignes exactement parallèles s'offriront à nous sous l'aspect de deux lignes convergentes. C'est par une cause semblable que quand on est à l'entrée d'une longue galerie, le plafond paraît aller un peu en s'abaissant, et le parquet en s'élevant.

1075. S'il n'existe qu'un seul plan, qui soit situé, à l'égard de l'œil, de la même manière que l'un ou l'autre de ceux qui convergeaient dans le cas précédent, comme quand on est à l'une des extrémités d'une longue pièce d'eau, ce plan paraîtra encore se relever de plus en plus à mesure que ses parties seront plus éloignées du spectateur; car alors on compare ce plan à la ligne de niveau qui passerait par l'œil, et qui fait l'office d'un second plan, dont le premier semble se rapprocher par la diminution des angles visuels qui partent des points correspondans pris sur l'un et l'autre plan.

1076. Si le spectateur est au pied d'une haute tour dont il regarde le sommet, elle paraîtra pencher de son côté : car il compare la position de cette tour à une verticale qui passerait par l'œil; et ainsi cette ligne verticale et la hauteur de la tour sont deux parallèles qui doivent tendre en apparence à concourir vers le haut. Dans ces sortes de cas, la ligne verticale et la ligne horizontale sont des espèces de limites idéales auxquelles l'œil rapporte les angles visuels dont un des côtés est toujours l'une ou l'autre de ces lignes, à peu près comme lorsqu'on veut estimer à l'œil l'inclinaison d'une ligne située dans l'espace, on la compare avec une horizontale ou une verticale imaginaire, qui passe par une des extrémités de la lignée donnée.

Lorsque nous nous trouvons à une certaine distance d'un terrain qui s'élève, il nous paraît plus long que dans le cas où il serait de niveau avec l'horizon; c'est ce qui est évident par la seule inspection de la *fig.* 143, où *mn* représente la position inclinée du terrain, et en même temps sa longueur,

mn' celle qu'il aurait s'il était horizontal, et *nom*, *n'om* les angles visuels analogues aux deux positions.

1077. On pourra expliquer, d'après les mêmes principes, une multitude d'autres illusions d'optique qui se présentent tous les jours à un observateur tant soit peu attentif. Par exemple, s'il est situé vis-à-vis du milieu d'une longue ligne fort éloignée, il la verra s'infléchir à droite et à gauche, ensorte qu'elle lui paraîtra une portion de courbe dont l'axe passerait par son œil. S'il a devant lui un polygone régulier d'une certaine étendue, les côtés situés parallélement à la surface de son corps lui sembleront plus grands que ceux qui sont obliques, et le polygone deviendra irrégulier en apparence. C'est une observation qu'il est facile de faire, et dont on peut varier à volonté les circonstances, en prenant diverses positions à l'égard du grand bassin des Tuileries.

Notion de la Perspective.

1078. Ce que nous venons de dire nous conduit à quelques considérations générales sur la perspective. Le but de cette science est de représenter sur un plan des corps de toutes les formes. Or, si l'on conçoit, pour plus de simplicité, que le corps dont on se propose de tracer l'image soit terminé par des faces planes, les figures de ces faces différeront nécessairement dans l'image de ce qu'elles sont sur le corps même. Par exemple, si l'on veut représenter un cube, on pourra bien donner la figure d'un carré à l'une des faces de l'image; mais les deux faces adjacentes qui concourent avec la première à la formation d'un même angle solide, seront évidemment des quadrilatères d'une figure différente, puisque la somme des trois angles plans dont il s'agit, considérés dans l'image, doit être équivalente à quatre angles droits, tandis qu'elle n'en vaut que trois sur le solide. Malgré cette différence, on ne laisse pas de parvenir à un certain assortiment de lignes qui fait une sorte d'illusion, et offre à l'œil un portrait fidèle de l'objet original.

Pour concevoir la raison de cette illusion, supposons un cube situé dans l'espace, sous une position déterminée, relativement à l'œil du spectateur, et supposons de plus que le cube soit transparent. Il résulte de ce que nous avons dit sur la manière dont s'opère la vision, que les axes des différens pinceaux de lumière envoyés par tous les points du cube, et qui sont les seules lignes dont nous ayons besoin ici, après s'être croisés dans le trou de la prunelle, formeront une espèce de petite pyramide dont la base reposera sur le fond de l'œil, où elle produira l'image du cube. Maintenant supposons entre l'œil et le cube un plan, ou tableau transparent, à travers lequel passent tous les axes qui vont des différens points du cube à cet œil, en y laissant leur empreinte, et imaginons qu'alors le cube disparaisse. L'image formée par l'ensemble des empreintes deviendra l'objet immédiat de la vision; et comme tous les points de cette image enverront à l'œil des rayons dirigés comme ceux qui partaient immédiatement du cube, la copie offerte par le tableau fera naître au fond de l'œil des impressions semblables à celles qu'avait produites la présence de l'objet original. Or, cette copie est ce qu'on appelle la *perspective du cube*. On conçoit, d'après cela, comment cette copie, dont tous les traits sont sur le passage des rayons qui proviendraient des différens points d'un cube, doit rendre ce solide aussi fidèlement que puisse le permettre le niveau du plan qui sert de toile au tableau. La géométrie fournit des règles pour tracer les lignes qui composent comme le dessin de ces sortes de portraits; et lorsqu'à ce dessin, qui a déjà par lui-même un caractère frappant de vérité, l'art de la peinture ajoute la distinction des ombres et de la lumière, et la magie du coloris, il résulte de ce concours une illusion à laquelle il ne semble manquer, pour être parfaite, que ce qu'il faut pour ménager à l'œil, en se faisant sentir, tout le plaisir de la surprise.

Cause de la Grandeur que paraît avoir la Lune à son lever.

1079. Une des illusions d'optique les plus remarquables, est celle qui nous fait juger la lune plus grande lorsqu'elle se lève, que quand elle est à une certaine hauteur au-dessus de l'horizon. Il n'est personne qui n'ait été frappé plus d'une fois du contraste que présente le diamètre de cet astre, comparé à lui-même, dans les deux circonstances dont nous venons de parler. Pour en concevoir la raison, il faut partir de ce principe, que nous voyons le ciel sous la forme d'une voûte très-surbaissée. Soit T (*fig.* 144, Pl. 10) la moitié du globe terrestre élevée au-dessus de l'horizon *ux*; soit *uytx* la moitié du cercle que parcourt la lune par son mouvement diurne, et *acgb* la moitié correspondante de la courbe qui termine l'atmosphère (1) : les différentes couches dont celle-ci est composée réfléchissent de préférence les rayons bleus de la lumière du soleil, et ces rayons, renvoyés vers nos yeux, nous font voir l'atmosphère de cette même couleur. La surface *acgb*, qui est comme la limite jusqu'où s'étendent toutes ces réflexions, devient ainsi à nos yeux comme une voûte à laquelle tous les astres nons semblent attachés. Supposons un observateur placé au point *o*, et menons par ce même point un plan *poi* parallèle à *ux*. Le spectateur, pour qui la courbure de la terre est insensible, sera dans le même cas que si ce plan existait réellement, et ainsi la voûte céleste se réduira dans son jugement à l'arc *dcge*, qui repose sur le même plan; d'où il suit qu'il verra les points extrêmes *d*, *e* de cette voûte, beaucoup plus éloignés que le point culminant *l*.

D'une autre part, les objets qui sont interposés entre nous et la lune, lorsque cet astre est à l'horizon, contribuent encore

(1) On a représenté ici, pour plus de facilité, l'atmosphère plus étendue qu'elle ne l'est en effet; mais le véritable état des choses est à l'avantage de l'explication.

à augmenter la distance apparente des points *d*, *e*, par rapport au spectateur (1070), et à diminuer la courbure qu'il attribuait à la voûte du ciel.

Supposons que *flh* soit une coupe de cette voûte, telle que nous nous la représentons par l'effet des deux causes dont on vient de parler. Les arcs *pu*, *ix* étant censés infiniment petits, à cause du grand éloignement où se trouve la lune à notre égard, le moment où son centre parvient en *n* peut être regardé, sans erreur sensible, comme celui de son lever. Le spectateur alors la voit sous l'angle *por*, et la rapporte en L à la distance *of*. Lorsqu'ensuite la lune est arrivée en *z*, c'est-à-dire, au méridien, le spectateur la voit encore sous le même angle *p'or'*, mais il la rapporte en *l*, c'est-à-dire, à un point situé beaucoup plus près de lui; ainsi, quoique l'image de la lune occupe toujours le même espace dans l'œil du spectateur, comme cet astre lui paraît à une plus petite distance, il le juge aussi plus petit, à peu près dans le rapport de la ligne *ol* à la ligne *of*; car alors les deux produits qui résultent de l'impression de la grandeur combinée avec celle de la distance (1067) ayant une quantité commune, qui est la première impression, sont en quelque sorte proportionnels à la seconde; et ainsi nous nous formons une idée des grandeurs réelles, d'après le rapport entre les distances apparentes.

1080. Mallebranche, à qui l'on est redevable, au moins en grande partie, de cette explication, l'a vérifiée à l'aide d'une expérience simple et facile à faire; elle consiste à regarder la lune, lorsqu'elle est à l'horizon, à travers un verre enfumé. Dans ce cas, on ne la voit pas plus grande que quand elle est au méridien, pourvu que le verre soit si près de l'œil; qu'il éclipse entièrement tous les autres objets, et ne nous laisse aucun moyen d'estimer les distances (1).

(1) Recherche de la Vérité, t. I, p. 127 et suiv.; et t. III, p. 159 et suiv.

Illusions produites par le Mouvement.

1081. Une autre scène non moins variée que la précédente, est celle que remplissent les illusions d'optique dont la source est dans le mouvement actuel des corps qui les font naître. Concevons d'abord un objet immobile, et un spectateur qui se meuve, par exemple, de gauche à droite, mais d'une manière insensible pour lui-même ; l'objet, dans ce cas, se trouvant situé toujours plus à gauche par rapport au spectateur, l'œil de celui-ci recevra la même impression que si, étant immobile, il avait vu faire à l'objet un mouvement de droite à gauche : en général, lorsque nous faisons des mouvemens sans nous en appercevoir, nous les rapportons en sens contraire aux objets qui nous environnent. Ainsi, lorsque nous sommes tranquilles sur un bateau qui se meut, nous voyons les arbres, les édifices et les autres objets venir à nous, passer devant nous ou s'éloigner, suivant que le bateau est emporté par des mouvemens opposés : c'est ce qu'un poëte célèbre a exprimé d'une manière pittoresque, lorsqu'il fait dire au navigateur qui sort de la rade, que les terres et les villes s'éloignent de ses yeux (1).

1082. Supposons que le spectateur se croyant toujours en repos, fasse un mouvement représenté par AB (*fig.* 145), tandis qu'un objet situé à une certaine distance parcourt *ab*. Dans cette hypothèse, A*f* sera le rayon visuel sur la direction duquel le spectateur verra l'objet au commencement du mouvement, et B*d* celui sur la direction duquel il le verra à la fin du mouvement. Donc si telles sont les positions relatives et les longueurs des lignes AB, *ab*, que les deux rayons visuels se croisent en quelque point *c*, l'objet paraîtra au spectateur avoir fait un mouvement de gauche à droite, ou de *f* vers *d*, c'est-à-dire, en sens contraire du mouvement réel qui a eu lieu suivant *ab*.

---

(1) *Provehimur portu; terræque urbesque recedunt.* VIRGIL., AEn., lib. III, v. 72.

Pour rendre cette explication plns sensible, nous pouvons supposer qu'au premier instant du mouvement le spectateur regardait l'objet situé en *a*, à l'aide d'une lunette dirigée suivant A*a*; il laisse ensuite cette lunette dans la même position pendant tout le temps du mouvement, ensorte que quand l'objet est arrivé en *b*, la lnnette est dirigée suivant B*n* parallèle à la ligne A*a*. Ponr voir alors de nouveau l'objet, le spectateur est obligé de mettre la lunette dans la position B*b*, c'est-à-dire, de la faire tourner de gauche à droite, ce qui lui fait juger que l'objet s'est mu dans le même sens.

1083. Concevons maintenant que le spectateur parcourre AB (*fig.* 146) tandis que l'objet fait le mouvement *ab* situé en sens contraire de AB. Si le spectateur était immobile, les rayons visuels relatifs aux deux termes extrêmes du mouvement de l'objet seraient A*af* et A*br*, ensorte que le spectateur jugerait de la grandeur de ce mouvement par l'ouverture de l'angle *b*A*a*; mais parce que lui-même a parcouru AB, les deux rayons visuels seront A*f* et B*d*, et l'angle d'après lequel le spectateur estimera la grandeur du mouvement sera *dcf*, ou son égal A*c*B, plus grand que l'angle *b*A*c* qui aurait lieu dans le cas où le spectateur serait immobile, puisqu'il est égal à la somme des angles *b*A*c* + A*bc*. Donc le spectateur jugera le mouvement de l'objet plus rapide qu'il ne l'a été en effet, parcequ'en lui rapportant son propre mouvement le long de AB, suivant une direction BA qui est dans le même sens que celle du mouvement de l'objet, il lui attribue une accélération de vîtesse qui lui est étrangère. Dans l'hypothèse où le spectateur emploierait encore ici une lunette pour regarder l'objet, cette lunette, d'abord dirigée suivant A*f*, ayant à la fin du mouvement une position suivant B*n* parallèle à A*f*, se détournerait en décrivant l'angle *n*B*d* beaucoup plus grand que l'angle *f*A*r*, qui aurait eu lieu si le spectateur fût resté immobile.

1084. Supposons enfin que le mouvement AB (*fig.* 147) du spectateur et le mouvement *ab* de l'objet aient lieu dans un même sens, et que les directions des deux lignes suivant lesquelles ils se font, soient tellement combinées avec les temps

employés à parcourir ces lignes, que les rayons visuels A*a*, B*b* relatifs aux deux termes extrêmes du mouvement, et tous les autres rayons qui se rapportent aux points intermédiaires, soient sans cesse parallèles entre eux : alors l'objet paraîtra immobile au spectateur, qui s'imagine être lui-même en repos, et l'on conçoit aisément qu'il verrait constamment cet objet au bout d'une lunette qui resterait dans la même position.

L'hypothèse d'un spectateur qui ayant un mouvement insensible pour lui-même, le rapporte en sens contraire à des objets immobiles, a servi à expliquer le mouvement diurne apparent du soleil, en conséquence du mouvement réel qui fait tourner la terre autour de son axe; on peut déduire aussi du même principe l'explication du mouvement annuel que le soleil nous paraît avoir dans l'écliptique. Les autres hypothèses, relatives aux mouvemens simultanés du spectateur et d'un objet qu'il a sous les yeux, ont fourni la véritable cause des dérangemens apparens que présentent les mouvemens périodiques des planètes, suivant que l'on croit voir ces astres ou rétrograder dans leurs orbites, ou accélérer leur vîtesse, ou enfin rester stationnaires pendant un certain temps (1).

1085. Lorsque nous courons en regardant un objet situé à une très-grande distance, et qui est sans mouvement, ou n'en a qu'un imperceptible pour nous, il nous semble que cet objet court avec nous et du même côté ; c'est ce qui arrive, par exemple, lorsqu'en courant nous portons nos yeux vers la lune. Le rayon visuel, toujours dirigé vers cet astre, fait alors des angles si petits avec lui-même, à mesure qu'il change de position, à cause de l'immensité de la distance, que ses directions sont sensiblement parallèles entre elles, ensorte que la lune nous paraît se mouvoir sur l'extrémité de ce rayon ; et comme nous avons le sentiment du mouvement que fait l'œil, d'où part le même rayon, nous en attribuons un semblable à la lune.

(1) *Voyez* l'explication développée de ces phénomènes, dans le Traité Elémentaire d'Astronomie Physique de M. Biot, p. 530.

Phénomène de l'Aberration.

Nous avons dit (853) que le mouvement progressif de la lumière, combiné avec celui de la terre dans son orbite, avait fourni l'explication du phénomène appelé *aberration des étoiles*. Cette explication, qui ramène à une simple illusion d'optique le phénomène dont il s'agit, trouve ici naturellement sa place.

1086. On avait remarqué dans les étoiles fixes de petits mouvemens que quelques astronomes avaient été tentés de regarder comme une apparence uniquement produite par le mouvement de la terre dans son orbite. Choisissons le cas le plus simple, qui est celui où l'étoile que nous prenons pour exemple serait située au pôle de l'écliptique, et supposons que la conjecture des astronomes dont nous venons de parler eût eu quelque fondement. Dans cette hypothèse, où l'observateur rapportera à l'étoile son propre mouvement insensible pour lui-même, il est clair que ses différens rayons visuels, dirigés constamment vers l'étoile, formeront un cône, dont la base sera l'écliptique, et dont le sommet coincidera avec l'étoile. Les mêmes rayons prolongés formeront au-dessus de l'étoile un second cône opposé au premier par son sommet, et l'observateur rapportant continuellement l'étoile sur la direction de leurs prolongemens, croira voir cette étoile décrire dans le ciel un petit cercle, de manière que l'étoile lui paraîtra toujours dans le point de ce cercle diamétralement opposé au point de l'écliptique qu'il occupera lui-même.

Mais les étoiles fixes sont à une si grande distance de la terre, que l'angle formé par deux rayons visuels, qui, en partant des deux extrémités du diamètre de l'écliptique, iraient passer par un de ces astres, et que l'on appelle *angle de la parallaxe annuelle*, est d'une petitesse qui le rend inappréciable, ensorte que cette cause ne peut occasionner dans l'étoile aucune apparence sensible de mouvement : aussi le phénomène donné par les observations est-il tout différent ;

car l'étoile, au lieu de paraître dans la partie de son cercle annuel opposée à celle de l'écliptique dans laquelle se trouve l'observateur, est à 90^d. en deçà, de manière que l'étoile retarde toujours de ce même nombre de degrés par rapport au mouvement qu'elle aurait en vertu de la parallaxe. De plus, l'angle formé par le rayon visuel dirigé vers l'étoile, avec la ligne qui passe par le centre du cercle où est la véritable position de l'étoile, est de $20''$, d'où il suit que le diamètre du cercle qu'elle paraît décrire dans le cours d'une année est de $40''$.

1087. Bradley, qui avait observé avec beaucoup d'assiduité toutes les circonstances de ce mouvement apparent des étoiles fixes, découvrit enfin la véritable explication du phénomène, et l'idée qui la lui suggéra fut un de ces traits de génie qui font époque dans l'histoire des Sciences. Mais avant d'exposer cette explication, il faut établir le principe qui lui sert de base.

Supposons qu'un rayon de lumière, en partant du point radieux a (*fig.* 148), vienne frapper un œil situé en m suivant une direction am, et avec une vîtesse représentée par cette ligne ; supposons de plus qu'au moment où l'œil est frappé par ce rayon il se meuve lui-même suivant une direction mf, et représentons par mn l'espace qu'il parcourt dans chaque instant égal à celui que le rayon emploie à parcourir am. L'œil recevant en m le rayon am, le frappera lui-même avec l'intensité de sa propre vîtesse mesurée par mn, et le spectateur s'imaginera recevoir l'impression d'un mouvement qui lui serait imprimé dans la direction opposée nm, avec une vîtesse représentée par cette ligne ; et l'on concevra, avec un peu d'attention, que cette impression apparente aurait encore lieu dans l'hypothèse où le rayon serait immobile dans l'espace. Mais, d'une autre part, l'œil reçoit réellement l'impression du mouvement qu'avait le rayon dans la direction am ; d'où il suit que si l'on termine le parallélogramme $mnda$, les deux impressions se composeront de manière que l'œil sera dans le même cas que si le rayon de lumière était venu le

frapper dans la direction de la diagonale *dm*. Concluons de là que l'œil verra le point radieux *a* sur cette même direction.

Il résulte de ce qui vient d'être dit, que si la vîtesse de nos mouvemens ordinaires avait, avec celle de la lumière, un rapport appréciable, nous ne pourrions aller et venir sans rapporter les objets environnans hors de leurs véritables positions. Mais comme, dans ce cas, la vîtesse de la lumière est censée infinie relativement à la nôtre, l'angle *amd* étant infiniment petit, la diagonale *md* coincide avec la direction réelle *am* de la lumière, et il n'en résulte aucun déplacement apparent de la part des objets.

1088. Il en est tout autrement du mouvement rapide par lequel la terre nous entraîne en parcourant son orbite annuelle, lorsque ce mouvement se combine avec celui de la lumière qui nous vient des étoiles. L'effet du double mouvement dont il s'agit est de faire voir les astres où ils ne sont pas, et de produire ces apparences si heureusement expliquées par Bradley.

Soit *a* (*fig.* 149) le lieu vrai d'une étoile fixe que nous supposons toujours située au pôle de l'écliptique ; soit *tnzm* la circonférence de ce cercle, et *n* le lieu du spectateur. Tandis que l'œil de celui-ci est frappé par un rayon *an* parti de l'étoile, il le frappe lui-même de manière qu'à l'égard du spectateur l'impression se transforme en celle qu'il recevrait, si son œil était frappé dans la direction *rn*, qui coincide avec la tangente au point *n*. Concevons que *an* et *nr* soient entre elles dans le même rapport que celui qui existe entre la vîtesse de la lumière et la vîtesse de la terre dans son orbite, et complétons le parallélogramme *anrc*. D'après ce que nous avons dit, il n'y a qu'un instant, l'œil rapportera l'étoile sur la direction de la diagonale *nc*. Or, la vîtesse de la lumière est à celle de la terre dans son orbite comme 10313 à l'unité ; et si l'on calcule d'après ces données la valeur de l'angle *anc*, on la trouvera de 20″, conformément à l'observation.

Maintenant si le mouvement de l'étoile pouvait être l'effet de la parallaxe, le spectateur placé en *n* rapporterait l'étoile

sur la direction de la ligne *na*, d'où il suit qu'il verrait l'étoile dans la partie qui répond à *d* sur le diamètre correspondant du petit cercle annuel que l'étoile paraîtrait décrire dans le ciel ; mais il la voit, au contraire, à l'extrémité *c* du diamètre qui coupe le précédent à angle-droit. Le même effet se répétera pendant tout le mouvement du spectateur dans l'écliptique ; et ainsi l'étoile en parcourant son cercle d'aberration *gcdb* est toujours, comme nous l'avons dit, en arrière de 90^d, relativement à la position qu'elle aurait, si la parallaxe annuelle était la cause de ses déviations apparentes.

1089. Nous avons ramené le phénomène au cas le plus simple, qui est celui où l'étoile étant située au pôle de l'écliptique, tous les rayons qu'elle envoie au spectateur sont perpendiculaires sur la route de l'œil, ensorte que l'étoile paraît décrire un cercle, parceque la différence entre les deux diamètres de l'ellipse qui représente l'orbite de la terre, peut être négligée dans le cas présent : alors, la quantité de l'aberration est constamment de $20''$. Les mouvemens apparens des autres étoiles qui ont des positions différentes, produisent des ellipses plus ou moins alongées, dans chacune desquelles la quantité de l'aberration augmente et diminue alternativement, à mesure que l'étoile s'approche des extrémités du grand axe ou du petit axe de son ellipse.

L'explication que Bradley a donnée du phénomène dont il s'agit ici, en même temps qu'elle confirme la découverte du mouvement progressif de la lumière, ajoute aux preuves que l'on avait déjà du mouvement de la terre autour du soleil, et c'est ainsi que les vérités empruntent une nouvelle force des résultats qui nous les montrent enchaînées l'une à l'autre.

5. De la Vision aidée par l'Art.

1090. Nous avons remarqué, en parlant des sons, la finesse de tact de l'oreille, pour les démêler les uns des autres, lorsqu'ils sont comme fondus ensemble dans une même harmonie

Rien

Rien ne paraissait plus admirable que cette espèce de discernement de l'oreille ; mais nous n'avions pas encore parlé de l'œil. Représentons-nous cet organe en présence d'une scène vaste et parsemée d'objets de toutes les grandeurs, de toutes les formes, de toutes les teintes ; cette scène se transporte toute entière, dans un instant indivisible, au fond de l'œil sur un espace incomparablement plus petit qu'un seul des objets qu'elle embrasse, et les rayons qui, pour remplir ce message, viennent de tous les objets, disons mieux, de tous les points de chaque objet, passent en foule et comme pêle-mêle, par l'ouverture beaucoup plus petite encore de la prunelle, sans que leur harmonie en soit altérée : l'œil, à son tour, sans aucune confusion, saisit, dans cet ensemble immense, tous les détails dont chacun forme seul un ensemble : il les isole ou les groupe à son gré ; et tandis que l'oreille, frappée en même temps par un trop grand nombre de voix, n'entend plus que du bruit, l'œil, au milieu de tous ces langages divers que tant d'objets semblent lui parler, distingue ce que chacun d'eux veut lui dire, et le contraste même que forment les mouvemens des uns avec l'immobilité des autres, ne trouble point cette espèce de commerce. Change-t-il lui-même de position ? Se tourne-t-il d'un autre côté ? Nouvelle scène, nouveau concours d'impressions variées, toujours également nettes et distinctes ; tout a changé pour lui, mais il est encore le même.

Tel est l'organe de la vue, lorsque seul, et sans aucun secours étranger, il exerce ses facultés naturelles. Il nous reste à exposer ce qu'ont fait les arts pour étendre encore sa puissance, et lui procurer de nouvelles manières de voir.

Des Effets de la Lumière régulièrement réfléchie, relativement à la Vision.

Nous avons expliqué (996 et suiv.) de quelle manière les rayons de la lumière, réfléchis par les surfaces plus ou moins

raboteuses des objets ordinaires, nous en font appercevoir les formes et les couleurs. Mais lorsque la réflexion se fait régulièrement à la surface des corps polis, auxquels on a donné le nom de *miroirs*, les rayons renvoyés par ces surfaces se dirigent vers nos yeux, comme s'ils partaient des différens points d'un objet imaginaire, qui se présente à cet organe avec tous les caractères de la réalité. Nous allons examiner successivement les propriétés dont jouissent les miroirs plans, les miroirs concaves et les miroirs convexes.

Du Miroir Plan.

1091. Si nous supposons un point radieux situé vis-à-vis d'un miroir plan, il est d'abord évident que ce point envoie de toutes parts des rayons divergens sur la surface de ce miroir. Tous ces rayons sont repoussés de manière qu'ils font leur angle de réflexion égal à l'angle d'incidence. Concevons maintenant un œil situé en présence du même miroir : parmi les rayons réfléchis suivant une infinité de directions différentes, il y en aura un certain nombre qui se dirigeront vers le trou de la prunelle par lequel ils passeront, et l'on pourra considérer leur ensemble comme un cône tronqué, dont la plus grande base serait égale au cercle de la prunelle, et dont la plus petite base reposerait sur la surface du miroir. Or, cette dernière base est commune au cône dont il s'agit, et à un autre cône composé de rayons envoyés par le point radieux ; mais la réflexion n'a fait autre chose que plier les rayons, elle n'en a point dérangé les positions respectives ; d'où il suit qu'ils arrivent à l'œil précisément dans le même ordre et avec le même degré de divergence que s'ils venaient immédiatement d'un point imaginaire situé à l'endroit où concourraient les rayons qui forment le cône tronqué, s'ils étaient prolongés derrière le miroir. L'œil sera donc affecté comme si ces prolongemens étaient réels ; car l'impression qu'il reçoit dépend uniquement de la direction du mouvement qu'ont les rayons à l'instant où ils arrivent ; tout le reste se passe comme à son

insçu ; et parcequ'il a l'habitude de rapporter les objets à quelque point de la ligne droite suivant laquelle les rayons viennent le frapper, il verra au sommet imaginaire du cône qui est entré par la prunelle, une image du point radieux, qui produira en lui la même illusion que si ce point avait été transporté tout à coup derrière le miroir.

De plus, il est facile de concevoir que l'image sera placée au-delà du miroir, à la même distance où l'objet se trouve en deçà, puisque le cône imaginaire qui aboutit à cette image est égal et semblable au cône réel qui part de l'objet, et qu'il fait le même angle avec la surface du miroir.

On saisira encore mieux cette explication à l'aide de la *fig.* 150, où AB représente une ligne prise sur la surface d'un miroir plan, R le point radieux, *s*R*t* le cône de rayons qui, après avoir été réfléchi en *st*, se dirige vers l'œil situé en o, et lui fait voir l'image du point radieux à l'endroit *r* du concours imaginaire des rayons *ms*, *nt*, et de tous les rayons intermédiaires (1).

---

(1) Si le miroir est métallique, on doit concevoir que parmi les rayons partis du point R, les uns sont réfléchis au contact de l'air et de la surface AB, tandis que les autres, après avoir pénétré la petite épaisseur des molécules situées près de cette même surface, subissent sur leur base intérieure une réflexion qui les renvoie vers la base opposée, d'où ils repassent dans l'air environnant (1010). Il en résulte que l'œil reçoit deux images du point radieux, mais qui se confondent sensiblement, à cause de la distance presque infiniment petite entre les deux surfaces réfléchissantes. A l'avenir nous ne distinguerons pas les deux réflexions dont nous venons de parler, et nous supposerons, pour plus de simplicité, que l'image principale soit celle qui provient des rayons réfléchis sur la surface du miroir, quoique ce soit réellement celle que produisent les rayons qui ont pénétré les molécules métalliques situées au même endroit.

Si le miroir est une glace étamée, il y a trois réflexions, la première au contact de la surface antérieure de la glace et de l'air, une seconde au contact de sa surface postérieure et de l'amalgame, et la troisième sur les bases intérieures des molécules métalliques. Mais des deux dernières réflexions sont censées coïncider de même sur les directions communes, et nous nous exprimerons comme s'il n'existait que celle qui a lieu à la surface de l'amalgame.

1092. Au lieu d'un simple point radieux, plaçons devant le miroir un objet étendu dans les trois dimensions ; les résultats de la lumière réfléchie seront encore les mêmes que ceux de la lumière directe, c'est-à-dire, que l'œil verra derrière le miroir une image égale et semblable à l'objet, et tellement située, que tous les points qui se correspondront sur l'un et l'autre seront aux mêmes distances au-delà et en deçà du miroir.

On jugera aisément que tous les gestes que fait un homme devant un miroir, sont répétés en sens contraire par son image ; et de là vient que quand nous voulons exécuter, à l'aide du miroir, des mouvemens qui exigent que nous nous voyions nous-mêmes, nous avons besoin d'un certain exercice pour éviter de nous laisser séduire par cette imitation trompeuse.

Nous ne pouvons voir dans un miroir qu'une partie de nous-mêmes, dont la hauteur soit double de celle du miroir ; car la hauteur de l'image représente la base d'un triangle, dont les côtés sont ceux de l'angle visuel qui sous-tend cette hauteur ; et, dans le même cas, la hauteur du miroir représente une ligne qui coupe le triangle parallélement à sa base. Or, cette ligne divise chaque rayon visuel en deux parties égales, puisque le miroir est également éloigné de l'image et de l'œil ; d'où il suit que la ligne dont il s'agit est égale à la moitié de la base du triangle. Donc la hauteur du miroir est aussi la moitié de celle de l'image, et en même temps de la partie de notre corps, laquelle est représentée de grandeur naturelle par cette image.

1093. Etant données la distance de l'œil au miroir, et les hauteurs du miroir et de l'objet, on peut facilement déterminer à quelle distance du miroir il faudrait placer l'objet pour l'y voir tout entier dans une position parallèle à celle du miroir ; car supposant la chose faite, et employant la même construction que ci-dessus (1092), on concevra que le miroir intercepte, sur le triangle dont la base est la hauteur de l'image et dont les côtés sont ceux de l'angle visuel, un triangle plus petit, qui, ayant pour base la hauteur même du miroir, est semblable au grand triangle. On aura donc cette analogie : la base du petit triangle, ou la hauteur du miroir, est à la

base du grand triangle, ou à la hauteur soit de l'image soit de l'objet, comme la hauteur du petit triangle, on la distance de l'œil au miroir, est à la hauteur du grand triangle, ou à la distance de l'œil à l'image. Les trois premiers termes de la proportion étant connus, on trouvera facilement le quatrième, qui est égal à la distance de l'œil au miroir, plus à celle du miroir à l'image; d'où il suit qu'en retranchant du quatrième terme la distance de l'œil au miroir, qui est donnée, on aura la distance du miroir à l'image, la même que celle de l'objet au miroir. Par exemple, si la hauteur du miroir est de $1^{mèt.},6$, et celle de l'objet de $2^{mèt.},4$, et si la distance entre l'œil et le miroir est de 4 mètres, on trouvera 6 mètres pour la distance de l'œil à l'image, d'où ayant retranché 4 mètres, qui donnent la distance de l'œil au miroir, on aura 2 mètres pour la distance à laquelle il faudrait placer l'objet, à l'égard du miroir, pour l'y voir tout entier.

1094. Quand l'objet se meut devant le miroir, en s'avançant ou en reculant, l'image fait autant de chemin que lui derrière le miroir; mais si c'est le miroir même qui s'approche ou s'éloigne de l'objet, l'image fera une fois plus de chemin que lui. Supposons, par exemple, que le miroir recule d'un mètre devant l'objet; si l'image ne reoulait que d'une égale quantité, sa distance à l'égard du miroir se trouverait encore la même, et ainsi elle serait moindre d'un mètre que celle de l'objet au miroir. Il faut donc que l'image parcourre deux mètres, pour qu'il y ait toujours de part et d'autre égalité de distance.

1095. Il résulte de ce qui vient d'être dit, que si l'objet est dans une position verticale et que le miroir s'incline de $45^{d.}$ à l'horizon, la position de l'image deviendra horizontale, puisqu'il faudra que chaque point de la hauteur de cette image, qui était d'abord située verticalement, ait décrit un arc de $90^{d.}$, ce qui ne peut avoir lieu sans que la même image ne paraisse parallèle à l'horizon. On voit par là pourquoi les mouvemens des images qui se peignent dans l'eau, sont beaucoup plus sensibles que les agitations du liquide.

1096. Une autre observation qui est relative aux images à

l'égard desquelles l'eau fait l'office de miroir, c'est qu'en général elles sont faibles et comme simplement ébauchées, parcequ'elles ne sont produites que par la réflexion des rayons qui échappent à la puissance réfractive de l'eau (887). Cependant, lorsque nous sommes sur le bord d'un lac tranquille, les rayons, qui en partant des arbres et des édifices situés sur le bord opposé, sont réfléchis vers nos yeux par la surface de l'eau, étant très-obliques, et par là même beaucoup plus abondans, nous font voir les images de ces objets éloignés beaucoup plus nettement que nous ne voyons celles des objets semblables qui sont près de nous sur le même bord.

1097. La réflexion partielle dont nous venons de parler a également lieu pour les miroirs de glace; et de là vient que ces miroirs donnent deux images distinctes de chaque objet, dont l'une est produite par les rayons qui se réfléchissent sur la surface antérieure de la glace, et l'autre par les rayons qui, après avoir pénétré l'épaisseur de la glace, se réfléchissent au contact de la surface postérieure et de l'amalgame métallique dont elle est enduite. Cette dernière image est beaucoup plus vive que l'autre, ensorte qu'elle attire seule l'attention dans les cas ordinaires. Mais si l'on présente la tête d'une épingle à une petite distance de la glace, et que l'on donne au rayon visuel un certain degré d'obliquité, on appercevra très-sensiblement l'image réfléchie par la surface antérieure de la glace, et il y aura même telle inclinaison où elle sera vue plus distinctement que celle qui provient de la surface postérieure.

1098. Si l'on se sert, dans cette expérience, d'une bougie allumée, et que l'on tienne toujours l'œil très-incliné, alors au lieu de deux images de la flamme, on en verra cinq ou six placées à peu près sur une même ligne, les unes derrière les autres, et qui paraîtront toujours plus faibles à mesure qu'elles seront plus reculées derrière le miroir. Pour expliquer cet effet, supposons que AB (*fig.* 151) représente la coupe du miroir, que *r* soit un des points radieux qui composent la flamme de la bougie, et qu'il y ait un œil situé en *o*. Du point *r* il part un faisceau de rayons qui se dirige suivant *re*, et dont une partie

em, qui est dans un accès de facile transmission (995), pénètre la glace, tandis qu'une autre partie qui se trouve dans un accès de facile réflexion (*ibid.*), étant repoussée suivant *eh*, est perdue pour l'œil. La partie *em*, après s'être réfléchie au contact de la glace et de l'amalgame, arrive au point *u*, et si les deux surfaces du miroir étaient parfaitement parallèles, cette partie se trouverait toute entière dans un accès de facile transmission (1011); mais comme on ne peut pas supposer que le parallélisme soit rigoureux dans tous les points correspondans des deux surfaces du miroir, il suffit qu'il y ait, dans le petit espace situé autour de *u*, et sur lequel tombe le faisceau de rayons *mu*, quelques points qui donnent une unité de plus ou de moins dans l'intervalle correspondant, pour qu'une partie des mêmes rayons soit réfléchie de nouveau suivant *uy*, tandis que l'autre, après s'être réfractée dans l'air, se dirigera suivant *uo*, et fera voir à l'œil une image du point radieux, située sur la direction *ou*. Un second faisceau *rx* se soudivise de même, au point *x*, en deux parties, dont l'une *xz* pénètre la glace, et l'autre *xo*, qui est réfléchie à la surface antérieure, va rencontrer l'œil, et lui fait voir une seconde image du point radieux, située sur la direction *ox*, et qui est plus faible que la première, lorsque les rayons qui en portent à l'œil l'impression, font avec la surface du miroir un angle un peu considérable, parceque dans ce cas le nombre de ceux qui subissent la réfraction est beaucoup plus grand que le nombre de ceux qui échappent à son action. Les deux images que l'on apperçoit, lorsque l'on place une épingle à une petite distance de la glace, sont analogues à celles dont nous venons de parler; mais un troisième faisceau suit la route *ragltno*, de manière que, chaque fois qu'il rencontre la surface antérieure de la glace, il s'y soudivise de même en deux parties, dont l'une est réfractée et l'autre réfléchie; et telle est ici sa position, qu'après avoir subi deux réflexions en *g* et en *t*, au contact de la glace et de l'amalgame, il arrive à l'œil, et lui fait voir une troisième image située sur la direction *on* et moins sensible que les deux précédentes.

En considérant attentivement la figure, on se fera une idée des réfractions et des réflexions partielles qui ont lieu aux différens points d'immersion des rayons partis du point radieux. On conçoit qu'il doit y avoir d'autres faisceaux qui, après avoir subi, dans l'intérieur de la glace, trois réflexions, quatre réflexions, etc., iront peindre au fond de l'œil de nouvelles images du point radieux, mais qui s'affaibliront de plus en plus, à mesure que les réflexions et réfractions qui ne concourent pas à l'effet, auront dérobé successivement aux différens faisceaux une plus grande partie des rayons dont ils étaient primitivement composés. Or, comme à proportion que les rayons ont plus de détours à faire entre les deux surfaces de la glace, il est nécessaire que leur incidence ait lieu sur des points e, a, etc., situés toujours plus en arrière, à l'égard de l'œil, et que leur émergence se fasse par des points u, n, situés toujours plus en avant, leur inclinaison sur la glace diminuera à proportion, et chaque faisceau partiel de rayons émergens fera voir l'image qui lui appartient à une plus grande distance derrière la glace, que l'image précédente.

1099. Les jugemens que nous portons sur les grandeurs et les distances des images que nous offre un miroir plan, sont les mêmes que si les objets n'avaient fait que changer de position, et se transporter aux endroits où concourent les rayons repoussés vers l'œil par la surface réfléchissante; et comme la vision dans les miroirs n'a qu'un champ d'une médiocre étendue, l'image d'un objet, à mesure qu'elle s'éloigne par une suite des mouvemens que fait l'objet lui-même, conserve sa grandeur dans nos idées, parceque nous tenons compte en même temps de l'augmentation de distance.

Du Miroir Concave.

1100. Le miroir concave, qui va nous occuper maintenant, produit des effets très-particuliers, dont quelques-uns semblent tenir du prestige. Sous un certain point de vue, l'image paraît droite et située derrière le miroir, mais très-amplifiée, et en

même temps plus éloignée que ne l'est l'objet en avant. Vient-on à éloigner par degrés cet objet du miroir ? l'image disparaît d'abord, ou ne présente plus qu'un assemblage confus de lumière et de couleurs; mais tout à coup, à une plus grande distance, l'image reprenant sa forme, se renverse, et sort du miroir en allant vers le spectateur; et suivant les mouvemens que fait l'objet, elle le touche ou se place à côté de lui; on dirait que l'objet lui-même a doublé son existence.

1101. Pour expliquer ces différens effets, concevons que *bnm* (*fig.* 152) représente une portion de la circonférence d'un des grands cercles d'un miroir concave sphérique, et que R soit un point radieux situé dans le plan de ce cercle, et pris au-dessus du centre *c* : tous les rayons incidens R*d*, R*h*, R*f*, etc., qu'il faut supposer infiniment rapprochés, se réfléchiront du côté de l'axe R*n*, de manière que les rayons réfléchis s'entrecouperont, savoir *dr* et *ht* au point *r*, *ht* et *fg* au point *t*, *fg* et *og* au point *g* situé sur l'axe. Or, à mesure que les rayons incidens sont plus près de l'axe, les angles d'incidence de deux rayons voisins diffèrent moins entre eux, parceque les petits arcs qui avoisinent l'axe, tels que *no*, *of*, varient très-peu dans leurs inclinaisons par rapport à l'axe; d'où il suit que les rayons incidens qui répondent à ces petits arcs, font avec eux des angles à peu près égaux, tandis qu'à une certaine distance, telle que *d*, les inclinaisons des petits arcs éprouvant des variations très-sensibles, à cause que la courbe se relève rapidement en cet endroit, les angles d'incidence doivent varier eux-mêmes dans un grand rapport. Donc aussi les rayons réfléchis par les arcs voisins de l'axe feront entre eux des angles qui varieront très-lentement, et parconséquent il y aura toujours un certain nombre de ces rayons qui se couperont dans un très-petit espace situé vers *g*, sur l'axe de la courbe. Nous avons déjà remarqué (864) que cet espace considéré comme un point, est ce qu'on appelle le *foyer* des rayons partis de R. On voit ici une nouvelle application du principe, que les quantités qui approchent de leur limite varient par de très-petites différences (929), ensorte qu'il y a toujours un

certain espace où l'on peut les supposer à peu près constantes, et où leurs actions se condensent en quelque sorte. Dans le cas présent, la limite est l'incidence qui a lieu dans la direction de l'axe *cn*.

Idée des Caustiques par Réflexion.

1102. Si l'on conçoit une courbe *ayg*, à l'égard de laquelle les rayons réfléchis soient autant de tangentes, cette courbe se nomme *caustique par réflexion*, et il est évident qu'il s'en formera de l'autre côté de l'axe une seconde *gs* semblable à la première, et qui la coupera au foyer *g*.

1103. Si le point radieux R s'écarte du point *n*, les caustiques se rapprocheront de la circonférence *bnm*; car alors les angles d'incidence, et par une suite nécessaire les angles de réflexion, se trouvant diminués, chaque rayon réfléchi, tel que *hr*, se rejettera davantage du côté de l'arc *hn*, et par-conséquent tous ces rayons s'entrecouperont dans des points moins éloignés de la circonférence *bnm*.

1104. Supposons que le point radieux soit à une distance infinie de *n*; dans ce cas, le foyer *g* se trouvera précisément au milieu du rayon *cn*. Nous avons déterminé géométriquement (863) la position de ce point que l'on appelle *le foyer des rayons parallèles*, parcequ'à une distance infinie, les rayons incidens qui avoisinent l'axe deviennent sensiblement parallèles.

Au contraire, à mesure que le point radieux s'approchera du centre, les caustiques s'écarteront de la circonférence *bnm*; et lorsque le point radieux sera parvenu au centre, alors tous les rayons incidens se réfléchissant sur eux-mêmes, les caustiques se réduiront à un point unique qui se confondra avec le centre *c*.

1105. Si le point radieux descend ensuite au-dessous du centre, les caustiques s'éleveront au-dessus, de manière qu'elles formeront toujours des angles plus petits avec l'axe, aux endroits où elles s'entrecouperont; et lorsque le point radieux

sera arrivé au milieu du rayon cn, les rayons réfléchis les plus voisins de l'axe devenant parallèles (863), les caustiques se sépareront et s'étendront à l'infini par leurs parties supérieures.

Le point radieux continuant de descendre, les rayons réfléchis se trouveront dans deux cas différens ; car d'une part, les angles d'incidence des rayons ro, ri, etc. (*fig.* 153), jusqu'à un certain terme, se faisant sur des arcs peu inclinés à l'axe, les rayons réfléchis analogues $o\delta$, $i\varepsilon$, au lieu de s'entrecouper, divergeront entre eux (1) ; d'où il suit que si on les prolonge en dessous de l'arc bnm, ce seront leurs prolongemens qui se couperont, en formant une nouvelle caustique aux endroits p, z, etc. D'une autre part, les angles d'incidence des rayons suivans rk, rx, etc., ayant lieu sur des arcs qui se relèvent rapidement, les rayons réfléchis correspondans se rejetteront les uns vers les autres, et s'entrecouperont de manière à former la caustique $\mu\omega\varphi$ plus ou moins éloignée de celle qui lui correspond de l'autre côté de l'axe, au lieu que les caustiques produites en dessous de l'arc bnm auront en p un point d'intersection.

1106. La caustique $\mu\omega\varphi$ descendra vers l'arc bnm, à mesure que le point r se rapprochera lui-même de cet arc ; car alors les angles d'incidence des rayons rk, rx, etc., devenant toujours plus petits, les rayons réfléchis $k\delta$, $x\zeta$, feront eux-mêmes avec l'arc km des angles qui iront toujours en diminuant, et parconséquent ils s'inclineront de plus en plus vers le bas, et leurs intersections se feront plus près de l'arc bnm. Ce que nous disons ici de cet arc peut également s'appliquer à tout autre qui ferait partie de la surface concave du miroir.

1107. Voici maintenant les conséquences qui résultent de toutes ces différentes positions, relativement aux images produites par les miroirs concaves. Soit RAR′ (*fig.* 154) un objet placé en présence d'un miroir concave, entre le centre c et le foyer des rayons parallèles. Si par les extrémités R, R′,

(1) Les rayons incidens sont à peu près dans le même cas, par rapport à l'arc ni, que s'ils tombaient sur un miroir plan.

on mène les axes ncx, $n'cx'$, les cônes de lumière qui partent de ces mêmes extrémités, suivant des directions très-voisines de Rn, R′n', se réfléchiront de manière que leurs foyers seront quelque part en r, r', sur les parties des axes situées en dessus du centre c (864), et comme ce que nous disons ici des extrémités de l'objet s'applique également à tous les autres points, l'ensemble de tous les foyers produira une image rar' de cet objet, qui sera renversée, par une suite de ce que les axes se croisent au centre. Si l'on suppose au contraire que rar' soit l'objet, RAR′ deviendra l'image.

Mais ces sortes d'images sont perdues pour l'œil du spectateur. Car dans le cas où RAR′ est l'objet, cet œil ne pourrait voir l'image, qu'en se plaçant quelque part en o, dans l'espace situé au-dessus d'elle. Mais il serait nécessaire, alors que les prolongemens rx, $r'x'$ des rayons qui passent par les extrémités de l'image, au lieu d'etre divergens, convergeassent suivant des directions ro, $r'o$, qui allassent se croiser dans la prunelle. Et si l'on conçoit que rar' soit l'objet, on retombe dans la même difficulté ; car il est évident que dans aucun cas le spectateur ne pourra placer sa tete entre l'objet et l'image, sans intercepter les rayons qui vont de l'un à l'autre.

1108. On peut cependant appercevoir l'image lorsqu'elle est située derrière l'objet, comme en rr'. Mais il faut la recevoir sur un plan, où cette image se trouvant dans le meme cas que si elle avait été peinte, devienne visible à l'aide des cônes de rayons que ses différens points envoient vers l'œil. Cette expérience réussit assez bien, lorsque l'objet RAR′ est une petite lame transparente de verre coloré, qui donnant un passage aux rayons réfléchis, leur permet de parvenir en r, r', où est situé un carton blanc sur lequel l'œil voit l'image, en se plaçant de côté, dans une position inférieure à celle du carton.

Images ordinaires.

1109. Avant d'expliquer la manière dont l'œil apperçoit immédiatement les images produites par le miroir concave,

nous remarquerons que l'on peut raisonner de chacun des points *r*, *t*, etc. (*fig.* 152), à peu près comme du point *g*, situé sur l'axe, où il fait la fonction de foyer, par rapport aux rayons partis de R, qui forment de très-petits angles avec le même axe ; c'est-à-dire qu'il y a aussi autour du point *t*, par exemple, un très-petit espace dans lequel se réunissent, après leur réflexion, les rayons qui se meuvent du point R vers le miroir, dans des directions très-voisines de celles des rayons R*f* et R*o*, ensorte que chaque point de la caustique devient ainsi comme un foyer d'un ordre inférieur, dans lequel les rayons concentrent assez leur activité, pour que l'ensemble de leurs prolongemens affecte l'œil d'une manière sensible.

1110. Cela posé, concevons d'abord que l'objet soit ce même point radieux R, que la figure représente placé au-dessus du centre. Dans toutes les positions où l'œil pourra voir l'image, il la rapportera à quelque point de l'une des caustiques *ag* et *gs* : par exemple, s'il est situé de manière que les rayons réfléchis *ht*, *ft* (*fig.* 155), après s'être croisés en *t*, aient le petit degré de divergence convenable relativement à la position de l'œil en *o*, cet œil verra l'image en *t*, c'est-à-dire entre le miroir et le centre *c*.

1111. Si le point R (*fig.* 152) est placé dans ce centre, alors l'image se confondra avec l'objet et sera comme absorbée par lui, desorte qu'en quelque endroit que l'œil soit situé, il ne pourra appercevoir l'image. Par une raison semblable, si l'œil lui-même occupe le centre, l'image d'un point situé quelque part que ce soit, sera invisible pour lui, et il ne pourra appercevoir que sa propre image, qui sera fort confuse et couvrira toute la surface du miroir.

1112. Dans toutes les positions du point R entre le centre et le foyer des rayons parallèles, l'image paraîtra toujours devant le miroir, mais elle sera au-dessus du centre, puisque alors les caustiques sont elles-mêmes plus élevées que ce centre.

1113. L'image sera très-confuse, lorsque le point R se trouvera précisément au foyer des rayons parallèles, parceque

ces rayons seront mêlés avec ceux qui, plus éloignés de l'axe, convergeront vers l'œil, et auront ainsi des positions respectives contraires à celles qu'exige la netteté de la vision.

1114. Concevons enfin que le point r (*fig.* 153.) descende au-dessous du foyer des rayons parallèles : alors, suivant les différentes positions de l'œil, l'image paraîtra ou par devant le miroir, ou par derrière, ou bien l'œil la verra en même temps des deux côtés de la surface du miroir ; car si cet organe ne peut recevoir que des rayons réfléchis, tels que $o\delta$, $i\varepsilon$, qui divergent entre eux en partant du miroir, l'image sera vue seulement par derrière au point de concours z de ces rayons prolongés, et parceque les rayons $o\delta$, $i\varepsilon$ divergent moins que les rayons incidens ro, ri dont ils proviennent, il est clair que op sera plus grand que or, et iz plus grand que ri ; d'où il suit que l'image paraîtra à une plus grande distance derrière le miroir que celle où est situé l'objet en avant.

Si, au contraire, l'œil n'est à portée que de recevoir des rayons convergens, tels que $l\omega$; $k\omega$, prolongés au-delà de leur point de concours ω, ensorte que le diamètre de la prunelle occupe la distance $\vartheta\lambda$, l'image paraîtra dans ce même point ω.

Enfin si l'œil est placé vers le point ε, de manière que la prunelle puisse donner en même temps accès à des rayons qui appartiennent aux deux caustiques $\mu\omega\varphi$ et pz, il verra une image du point lumineux par devant le miroir, et une seconde par derrière ; et comme chaque caustique a son analogue de l'autre côté de l'axe, il pourra arriver que le spectateur voie l'image quadruple avec les deux yeux (1).

1115. Au lieu d'un simple point radieux, supposons un objet qui ait quelque étendue, et ne considérons que les rayons qui partent des extrémités de cet objet. Tout ce que nous avons dit du point r pourra s'appliquer à chacune de ces mêmes extrémités, ainsi qu'à tous les points intermédiaires.

---

(1) Pour que ces différens effets aient lieu, il est nécessaire que le miroir forme une portion un peu considérable de la sphère à laquelle il appartient.

Lorsque l'image sera vue derrière le miroir, elle paraîtra amplifiée et toujours droite; car alors le miroir concave ne diffère du miroir plan qu'en ce qu'il rend plus convergens vers l'œil les deux côtés de l'angle visuel qui sous-tend la grandeur de l'image, ce qui ne change rien à la situation de cette image, et en augmente seulement l'étendue. L'image, dans le même cas, paraîtra plus éloignée du miroir par derrière, que ne le sera l'objet en avant, puisqu'alors on pourra raisonner de chaque point de l'objet, comme nous avons fait (1114) par rapport à un seul point radieux. Enfin, on conçoit que l'image doit être déformée, puisque ses différens points ne peuvent avoir les mêmes positions respectives que les points correspondans de l'objet, comme cela a lieu quand on se sert d'un miroir plan.

1116. Une singularité des phénomènes que nous venons d'exposer, est qu'à mesure que l'objet s'approche du miroir, la distance apparente de l'image derrière le miroir augmente en même temps que la grandeur de cette image, ensorte qu'il arrive la même chose à cette image qu'à un objet dont les dimensions s'accroîtraient, tandis que cet objet s'éloignerait de nous; et ainsi, au lieu que, dans la vision ordinaire, nous jugeons toujours l'objet de la même grandeur, lorsqu'il recule devant nons, parcequ'en estimant l'augmentation de distance, nous rectifions l'erreur que la diminution de l'image au fond de l'œil pourrait occasionner dans le jugement que nous portons sur la grandeur réelle, ici, au contraire, où la distance et la grandeur de l'image croissent en même temps, la grandeur jugée doit aussi s'accroître dans un rapport considérable, puisque, en supposant que la distance apparente restât la même, il suffirait que l'image augmentât dans ses dimensions, pour nous la faire juger effectivement plus grande.

1117. Lorsque l'objet est au-dessus du foyer des rayons parallèles, auquel cas l'image est vue par devant le miroir, cette image est toujours renversée. Pour en concevoir la raison, il suffit de considérer qu'en meme temps que le point radieux R (*fig.* 152) descend vers le miroir, jusqu'au foyer des rayons parallèles, les caustiques s'écartent, au contraire, du miroir.

Or, on peut considérer deux points radieux situés l'un au-dessus de l'autre, comme les extrémités antérieure et postérieure d'un même objet. Donc la caustique qui produira l'image de l'extrémité antérieure, ou de celle qui est plus près du miroir, sera à une plus grande distance de ce miroir que la caustique relative à l'extrémité postérieure; d'où il suit que l'image entière sera elle-même située en sens contraire de l'objet.

1118. Mais pour mieux saisir la raison de ce renversement, supposons que R (*fig.* 156) étant un point radieux, il y ait un œil situé en *o*, de manière que Rz soit l'axe du pinceau de rayons incidens, et *zo* celui du pinceau de rayons réfléchis, à l'aide desquels l'œil voit l'image *r* du point R sur la caustique *ag*. Concevons que l'axe R*n* fasse un mouvement vers la droite, en tournant sur le centre *c*, pour prendre la position R′ *n*′; la caustique suivra ce mouvement, sans changer de situation relativement à l'axe, et l'œil verra l'image du point R′ à quelque endroit *r*′ de cette caustique *a*′*g*′; c'est-à-dire à l'endroit où elle sera touchée par l'axe *z*′*o* du pinceau de rayons réfléchis, provenant de l'incidence suivant R′*z*′; d'où il est aisé de juger que l'image du point radieux a fait un mouvement en sens contraire de celui de ce même point. Donc si l'on suppose que R, R′ soient les deux extrémités d'une flèche, la position de l'image *rr*′ de cette flèche sera renversée, et l'on conçoit en même temps que ce renversement tient à ce que les axes Rz, R′*z*′ des pinceaux de rayons incidens se croisent en un point *x*, avant de rencontrer le miroir, ce qui n'a pas lieu lorsque l'image est vue sans renversement.

1119. A l'égard du jugement que nous portons sur la grandeur de l'image, comme il dépend principalement du rapport entre les angles sous lesquels l'œil voit l'objet et l'image elle-même, il varie suivant les différentes distances qui séparent l'œil de l'un et de l'autre. En général, lorsque l'objet est plus voisin de l'œil que le lieu de l'image, il paraît plus grand qu'elle, et au contraire c'est la grandeur de l'image qui l'emporte, lorsque celle-ci est vue à une plus petite distance.

Entre

Entre les deux effets inverses, il y a un terme où l'image paraît égale à l'objet.

1120. Supposons maintenant l'objet placé au-dessous du foyer des rayons parallèles, et l'œil dans une des positions où il voit l'image par devant le miroir : dans ce cas l'image sera droite ; car nous avons vu qu'alors le mouvement des caustiques se faisait dans le même sens que celui du point radieux (1106), tandis que ce point s'approchait du miroir. Il en résulte que les parties antérieure et postérieure de l'image auront la même position, relativement au miroir, que les parties correspondantes de l'objet, et ainsi l'image entière sera tournée du même côté que l'objet.

Dans ce même cas, l'image sera plus grande que l'objet, parceque les axes des pinceaux de rayons incidens, qui partent des extrémités de l'objet, ne s'étant pas croisés avant d'arriver au miroir, cette circonstance les rend beaucoup plus susceptibles de converger après la réflexion, et augmente dans un rapport très-sensible la grandeur de l'angle sous lequel l'image est apperçue.

1121. Cette image paraît sur le côté du miroir, comme il est facile d'en juger par la position de la caustique $\mu\omega\phi$ (*fig.* 153), et des autres qui concourent à la formation de cette image. Au contraire, on peut toujours se placer de manière à appercevoir, dans l'espace qui répond au milieu du miroir, les images des objets situés au-dessus du foyer des rayons parallèles, et ce sont aussi ces dernières images qui produisent l'illusion la plus séduisante. On peut tellement disposer le miroir et l'objet qui sera, par exemple, un bouquet de fleurs, que tous les deux étant masqués par quelque corps étranger, ceux qui entrent dans l'appartement n'apperçoivent que l'autre bouquet produit par la lumière réfléchie, et soient bientôt surpris de sa disparition, lorsqu'en s'avançant vers lui, ils s'écartent de la position sous laquelle il était visible pour eux.

Usage des Miroirs concaves dans les Instrumens d'Optique.

1122. Les miroirs concaves sont employés dans la construction de plusieurs télescopes, dont nous donnerons une idée dans la suite. On préfère ceux de métal, qui n'offrent jamais qu'une seule image de l'objet, et on les fait communément au moyen de différens alliages, dont le choix et les rapports de quantité sont tels, que la surface du métal mélangé est blanche, et par là même disposée à réfléchir abondamment la lumière. Mais ces miroirs sont sujets à se ternir, et le cèdent beaucoup à ceux que l'on fabrique avec le platine, par le double avantage qu'a ce métal de résister à toutes les causes d'altération, et d'être d'une densité considérable qui en augmente le pouvoir réfléchissant.

Pour que les miroirs métalliques remplissent le but de l'observateur, il faut que leur forme, qui est une portion de sphère, soit travaillée avec une grande précision, et que leur poli soit très-parfait, sans quoi ils rendent les images confuses en absorbant une grande quantité de rayons. La difficulté de réunir ces conditions avait fait penser à Newton que les miroirs de verre étamés méritaient la préférence lorsqu'ils étaient construits avec soin (1); mais le succès n'a pas répondu à l'attente de ce célèbre géomètre, et l'on ne se sert guère aujourd'hui que de miroirs métalliques pour les télescopes et autres instrumens dans lesquels l'effet de la réflexion se combine avec celui de la réfraction.

Usage des mêmes Miroirs pour exciter la Combustion.

1123. Lorsque les rayons du soleil qui arrivent à nous dans des directions peu différentes du parallélisme, tombent sur la

(1) *Optice Lucis*, lib. I, pars 1, propos. 7.

surface d'un miroir concave, de manière que celui qui part du centre de l'astre se confond avec l'axe de ce miroir, la réflexion les fait coincider à peu près au foyer des rayons parallèles; là leurs actions concentrées excitent dans les corps qui s'y trouvent exposés une chaleur assez puissante pour enflammer ces corps, les fondre, ou les vitrifier, suivant les différentes natures des mêmes corps. C'est ce qui a fait donner à cette espèce de miroir le nom de *miroir ardent*.

1124. Un corps enflammé, situé en présence d'un miroir concave, envoie aussi vers la surface de ce miroir des rayons qui, après leur réflexion, se réunissent en un foyer commun; mais outre qu'ils ont par eux-mêmes beaucoup moins d'énergie que les rayons solaires, il résulte de leur divergence sensible, que ceux qui tombent très-près de l'axe sont beaucoup moins condensés dans un espace donné, ce qui ôte au foyer une grande partie de son activité. On peut déterminer leur incidence à se faire suivant des directions parallèles, en employant deux miroirs, dont le diamètre soit d'environ 40 centimètres (15 pouces), et dont telle soit la courbure, que la distance entre le foyer et la surface réfléchissante se trouve aussi à peu près de 40 centimètres. On élève ces miroirs verticalement, de manière que leurs concavités se regardent, et on peut les éloigner l'un de l'autre de 10 mètres (30 pieds) ou davantage. On place au foyer de l'un un charbon allumé, dont on entretient l'ardeur par un souffle bien égal, dirigé du côté qui est situé vers le miroir. Les rayons qui tombent sur ce miroir devenant parallèles après leur réflexion, rencontrent sous ces mêmes directions la surface de l'autre miroir, où une seconde réflexion les fait concourir au foyer des rayons parallèles, ensorte qu'ils deviennent assez actifs pour allumer un morceau d'amadou, ou des grains de poudre à canon, que l'on présente à ce foyer.

1125. Le Père Kirker a imaginé le premier de substituer à un miroir concave plusieurs miroirs plans, tellement disposés, que les rayons du soleil réfléchis sur leurs surfaces convergeassent vers un même point. Il n'employa que cinq de ces miroirs,

en les plaçant de manière que le concours des rayons se faisait à plus de $32^{m\acute{e}.},5$ (100 pieds) de distance, et il trouva que la chaleur y était presque insupportable. « Or, ajoute ce physicien, si cinq miroirs produisent un si grand effet, que ne feront pas cent ou mille miroirs arrangés de la même manière ? la chaleur qu'ils exciteront sera si violente, qu'elle brûlera tout, et réduira tout en cendres (1) ».

1126. Plusieurs physiciens ont entrepris depuis des expériences dirigées vers le même but ; mais l'espèce de miroir polygone, exécuté au Jardin des Plantes, en 1747, d'après l'idée qu'en avait conçue le célèbre Buffon, efface tout ce que l'on avait tenté jusqu'alors en ce genre, soit par la grandeur des effets, soit par l'ordonnance ingénieuse de la construction (2). Ce miroir était composé de cent soixante-huit glaces étamées, susceptibles de se mouvoir en tout sens, de manière que l'on était le maître de les fixer à différens degrés d'inclinaison ; il en résultait que l'on pouvait donner à l'ensemble une forme plus ou moins concave, et porter le foyer à différentes distances. Ce miroir brûlait le bois à 65 mètres (200 pieds), fondait les métaux à $14^{m\acute{e}.},5$ (45 pieds), et son auteur était persuadé qu'en multipliant les glaces on pourrait produire les mêmes effets à une distance beaucoup plus grande.

1127. On lit dans les anciennes histoires, qu'Archimède mit le feu aux vaisseaux des Romains, en se servant de miroirs ardens. Plusieurs physiciens ont traité ce récit de fabuleux, d'après le peu d'apparence que le savant Syracusain eût pu construire des miroirs concaves d'une assez grande étendue, pour que leurs foyers parvinssent à la distance où devait se trouver la flotte romaine. Mais le fait n'a plus rien d'impossible, si l'on suppose qu'Archimède ait employé les actions combinées de plusieurs miroirs plans, et ce célèbre géomètre

(1) Kirker, *Ars Magna Lucis et Umbræ*, lib. X, p. 888.

(2) Buffon, Histoire Naturelle, édition in-12, 1774; Supplément, t. II, p. 141 et suiv.

avait donné d'ailleurs des preuves plus que suffisantes, qu'il était capable de concevoir une pareille idée.

Du Miroir Convexe.

1128. Les effets du miroir convexe sont beaucoup moins variés que ceux du miroir concave ; ils se réduisent à faire voir l'image derrière le miroir, plus petite que l'objet et plus voisine de la surface réfléchissante. C'est l'inverse de ce qui a lieu, lorsque l'image est vue aussi derrière le miroir concave ; mais dans le même cas, les deux miroirs s'accordent à présenter l'image dans une position droite.

Soit *bnm* (*fig.* 157) une partie de la circonférence d'un des grands cercles du miroir convexe, et R un point radieux placé dans le plan de ce cercle. Si l'on suppose que les rayons réfléchis qui appartiennent aux rayons incidens R*n*, R*o*, R*f*, etc., se prolongent derrière la surface du miroir, jusqu'à ce que chacun soit coupé par le suivant, les intersections *g*, *r*, *p*, etc. de ces rayons produiront une caustique *gs* située du même côté de l'axe, et il s'en formera une seconde *gα* toute semblable du côté opposé, ensorte que les deux caustiques se couperont dans un point *g* situé sur l'axe.

A mesure que le point radieux s'éloignera ou s'approchera de l'arc *bnm*, les caustiques elles-mêmes s'en éloigneront ou s'en approcheront par des mouvemens contraires ; et si le point radieux est supposé à une distance infinie, le point *g* où se coupent les caustiques sera situé au milieu du rayon *cn* ; d'où il suit que c'est à ce même endroit que se trouve le foyer des rayons parallèles.

1129. Si l'observateur a son œil situé dans le plan de l'arc *bnm*, cet œil verra l'image du point radieux dans quelque point de l'une ou l'autre caustique : par exemple, si telle est la position de l'œil, que les rayons R*f*, R*h*, après s'être réfléchis suivant les lignes *fx*, *hu*, parviennent à la prunelle, l'image sera vue au point de concours *p* de ces mêmes lignes prolongées derrière le miroir.

1130. L'image paraîtra toujours plus près du miroir que l'objet ; car, à cause de la propriété qu'a le miroir convexe d'occasionner en général une tendance des rayons vers la divergence (866), il est évident que les rayons réfléchis divergeront plus entre eux que les rayons incidens, ce qui rapprochera leur point de concours imaginaire de la surface du miroir. On peut tirer la même conséquence de ce que le point *g* dans lequel se coupent les caustiques, et qui présente l'image du point radieux, lorsque l'œil est placé sur l'axe *c*R, ne parcourt que la moitié du rayon *nc*, tandis que le point radieux s'éloigne jusqu'à une distance infinie du miroir.

Si nous substituons à un simple point un objet d'une certaine étendue, son image sera vue de même derrière le miroir, à une moindre distance que celle où est placé l'objet par devant : en même temps elle paraîtra droite ; car, supposons que l'axe *c*R, en restant fixe par son extrémité *c*, fasse un mouvement qui ait lieu, par exemple, de gauche à droite, en entraînant avec lui le point radieux R ; il est évident que le mouvement de la caustique *gs* se fera dans le même sens ; donc si l'on suppose un objet dont les deux extrémités correspondent, l'une au point R, tel qu'on le voit sur la figure, l'autre à l'endroit où le même point a été transporté par le mouvement de l'axe, l'image de cet objet sera située, derrière le miroir, dans une position semblable à celle que l'objet occupe lui-même par devant ; et ainsi le miroir, à cet égard, ne différera pas du miroir plan, qui représente les objets dans leur véritable situation.

1131. Enfin, l'image comparée à l'objet paraîtra rétrécie dans toutes ses dimensions ; car l'effet de la réflexion sur les surfaces convexes étant de diminuer la convergence des rayons, il en résulte que les côtés de l'angle visuel sous lequel l'œil apperçoit l'image, convergent moins que ceux de l'angle sous lequel il verrait l'objet à la même distance ; et ainsi l'ouverture de l'angle et en même temps la grandeur apparente de l'objet doivent être diminuées.

Ici se présente une observation qui est, en quelque sorte,

l'inverse de celle que nous avons faite en parlant des miroirs concaves (1116). La distance et la grandeur apparente ayant diminué à-la-fois, la grandeur jugée doit être de même plus petite.

Miroirs Cylindriques ou Coniques.

1132. On fait aussi des miroirs en forme de cylindre ou de cône, dont les effets sont piquans pour la curiosité. On place leur base au milieu d'un dessin qui ne présente que des traits irréguliers, des espèces d'énigmes pour l'œil, dont le mot est dans le miroir même, où l'on apperçoit la figure régulière de quelque objet familier. La géométrie fournit des règles pour combiner les traits du dessin avec la courbure du miroir, de manière qu'il en résulte l'effet qu'on se propose. Comme le miroir représente les objets tout autres qu'ils ne sont, on profite de son infidélité même pour lui donner une image vicieuse à rectifier.

Des Effets de la Lumière réfractée, relativement à la Vision.

1133. Les progrès de la dioptrique ou de la science des rayons réfractés, dont nous allons maintenant nous occuper, ont été beaucoup plus lents que ceux de la catoptrique, qui a pour objet la lumière réfléchie. La loi fondamentale de cette dernière science, qui consiste dans l'égalité des angles d'incidence et de réflexion, devait, par sa seule simplicité, se présenter plus aisément ; et il y a tout lieu de présumer qu'Euclide, qui l'a appliquée aux effets des miroirs, dans son *Traité d'Optique*, n'avait fait que profiter des connaissances établies, depuis long-temps, dans l'école platonicienne, dont il suivait la doctrine. La loi à laquelle est soumise la réfraction de la lumière était encore inconnue, lorsque vers la fin du treizième siècle un Florentin, nommé *Salvino Degl' Armati*,

inventa les lunettes à lire, découverte admirable, à l'aide de laquelle l'œil, plus prompt à vieillir que les autres organes, retrouve tout à coup des années qui semblaient perdues sans retour. On attribue la première ébauche du télescope aux enfans d'un lunettier de Middelbourg en Zélande, qui s'étant avisés de disposer entre leurs doigts deux verres de lunette l'un derrière l'autre, firent remarquer à leur père que les objets vus par l'intermède de ces verres paraissaient beaucoup plus gros qu'à la vue simple. Le lunettier, frappé de cet effet singulier, imita, par une construction plus commode, le modèle que ses enfans venaient de lui présenter. D'autres artistes de la même ville s'appliquèrent à perfectionner cet instrument, qui porta d'abord le nom de *lunette de Hollande*.

1134. Mais pour tirer du télescope tous les avantages qu'il semblait promettre, il fallait connaître la loi de la réfraction. Kepler la chercha inutilement, mais il trouva, par l'observation, une espèce de règle qui était au moins un à peu près, et qui lui apprit que l'on pouvait substituer un oculaire convexe à l'oculaire concave que l'on avait employé jusqu'alors. Scheiner et Rheita enchérirent sur cette amélioration, et le dernier parvint à une combinaison de verres lenticulaires qui réunissait divers avantages à celui de redresser les objets que l'on voyait renversés avec un seul oculaire.

Enfin Snellius, géomètre hollandais, détermina la loi fondamentale de la dioptrique, qui, d'après la manière dont il l'envisageait, consiste en ce que les cosécantes des angles d'incidence et de réfraction sont en rapport constant. Descartes substitua à ce rapport celui des sinus dont il est l'inverse, et qui présente la même loi sous une forme plus simple; muni de ce résultat, il fit de savantes recherches sur les courbes les plus propres à concentrer dans un même point les rayons devenus convergens par la réfraction. Mais la difficulté d'exécuter des verres dont la forme fût assujétie aux lois de ces courbes, a fait revenir à la figure sphérique, ensorte que la science a plus gagné que l'art aux travaux de Descartes sur la dioptrique. Barrow, auquel avait été réservée la gloire de

servir de maître à Newton, si cependant Newton a eu besoin de maître, a publié sur la même science un ouvrage estimé, dans lequel il éclaircit plusieurs points qui n'avaient encore été traités qu'imparfaitement (1). La pratique, trop négligée jusqu'alors, fit de grands progrès entre les mains d'Huyghens, et l'art de tailler les verres lui doit une grande partie de sa perfection.

1135. Newton qui avait expliqué si heureusement la loi de la réfraction, par l'attraction du milieu réfringent, a aussi développé les principes de la dioptrique dans un ouvrage particulier (2), et a imaginé une espèce de télescope qui porte son nom, dans lequel il combinait les effets des verres convexes avec ceux du miroir concave. Mais il n'avait proposé cette construction que parcequ'il regardait comme impossible de détruire un défaut frappant qu'ont les télescopes et les lunettes ordinaires, qui est de décomposer la lumière comme le fait le prisme, et de produire ces franges de fausses couleurs dont les objets paraissent bordés, lorsqu'on les regarde au travers des instrumens dont il s'agit. Newton fut conduit à cette conséquence par une autre qu'il se pressa trop de tirer d'une expérience dont nous parlerons dans la suite, expérience simple et facile à faire, mais dont le véritable résultat échappa à son attention. Pendant près d'un demi-siècle on ne pensa point à la répéter, tant il était difficile de démêler une erreur perdue dans une foule de vérités importantes. Enfin, une expérience faite par Dollond, célèbre opticien anglais, dans les circonstances convenables pour la rendre décisive, et qui offrait un résultat opposé à celui de Newton, donna naissance aux lunettes achromatiques, dont nous ferons l'histoire dans un plus grand détail, lorsque nous y serons conduits par la suite des matières que nous avons à traiter; et cette découverte ouvrit une nouvelle carrière au génie des plus illustres géomètres, et aux talens des plus habiles artistes.

---

(1) *Lectiones Opticæ et Geometricæ*; Londini, 1674.

(2) Opusc. VIII, *Lectiones Opticæ*.

Nous parlerons successivement des effets de la réfraction dans les milieux terminés par des faces planes, et dans ceux dont les faces sont curvilignes; et, après avoir considéré les effets des verres simples, nous exposerons ceux des instrumens dans lesquels on combine entre eux, soit des verres courbes et des miroirs, soit seulement des verres sans miroirs.

De la Réfraction simple, dans les Milieux terminés par des Faces planes.

1136. Soit *a* (*fig.* 158) un point radieux pris dans un milieu quelconque terminé par la surface *ef*, et qui envoie vers cette surface des rayons dans une infinité de directions différentes. Supposons que *an* représente un de ces rayons, et que *nt* soit le rayon réfracté, lequel se rapprochera de la perpendiculaire *nx*, si le milieu situé au-dessus de *ef* est plus dense que celui qui est en dessous, ou s'en écartera (*fig.* 159, Pl. 11) dans le cas contraire.

Du point *a* menons *ab* perpendiculaire sur *ef*, et prenons entre *a* et *b*, ou du côté opposé (*fig.* 158), un point *z* tellement situé, que *zb* soit à *ab* comme le sinus d'incidence est au sinus de réfraction, relativement au milieu situé au-dessus de *ef*. On prouve par la géométrie que si l'on prolonge un rayon réfracté quelconque *tn*, jusqu'à ce qu'il rencontre l'axe *ab* de la radiation, le point *k*, où il coupera cet axe, sera toujours situé en decà (*fig.* 159), ou au-delà (*fig.* 158) du point *z*, ensorte que ce dernier point sera la limite de tous les rayons réfractés provenus du point *a* (1).

---

(1) Dans le triangle *ank*, l'angle *a* est le supplément de l'angle d'incidence *ban* (*fig.* 158) ou cet angle lui-même (*fig.* 159), et l'angle *k* est égal à l'angle de réfraction *xnt* (*fig* 158) ou à son supplément (*fig.* 159). Donc si nous désignons le sinus d'incidence par *i*, et le sinus de réfraction par *r*, nous aurons *nk* : *an* :: *i* : *r*.

Ayant mené par le point *z* la ligne *gh* parallèle à *ef*, prolongeons, s'il est nécessaire, *na* jusqu'à la rencontre de *gh*; nous aurons, à cause des triangles semblables *nab*, *saz*, *as* : *un* :: *az* : *ab*. Donc (*fig.* 158) *as* + *an* : *an* :: *az*

Concevons que le rayon incident *an* en restant fixe par son extrémité *a*, se rapproche de l'axe *bk* par son extrémité *n*. L'angle d'incidence *ban* étant diminué, l'angle de réfraction *xnt* le sera pareillement; de plus, le point *k* se sera rapproché du point *z*. Concluons de là que quand les rayons qui, en partant du point *a*, tombent sur la surface *ef*, sont à une petite distance de l'axe, les rayons réfractés forment à peu près à l'endroit du point *z* une espèce de foyer imaginaire; car, d'après le principe que toute quantité qui approche de sa limite varie par des degrés extrêmement petits (929), les rayons qui ont leur concours près du point *z* doivent être plus denses que partout ailleurs, ou abonder davantage dans un espace donné (1).

1137. Supposons que différens rayons *an*, *ai*, etc. (*fig.* 160), partis du point *a*, tombent en même temps sur la surface *ef*, à des distances sensibles du point *b*, et du même côté de l'axe. Leurs prolongemens en dessous de *ef* iront couper cet axe successivement en des points qui s'éloigneront du point *z*, d'où il suit qu'ils s'entrecouperont en divers points *d*, *c*, *m*, etc., situés à la gauche de l'axe (*fig.* 160), ou à la droite (*fig.* 161).

Si l'on considère les rayons *an*, *ai* comme les rayons extrêmes, parmi tous ceux qui, en partant du point *a*, tombent sur le petit espace *in* situé dans le plan *abf*, leur point de concours imaginaire sera au point *d*, que l'on détermine à l'aide du calcul. Mais il y a d'autres rayons partis du même point *a* qui tombent sur d'autres plans, et qui se dispersent par l'effet de la réfraction, de manière que tous ceux qui appartiennent à un petit cône dont la base aurait un diamètre

---

$+ ab : ab$; et (*fig.* 159) $an - as : an :: ab - az : ab$; donc $ns : an :: zb : ab :: i : r$; mais nous avons en $nk : an :: i : r$. Donc $nk = ns$. Or, à cause de l'angle obtus *nzs* (*fig.* 158), ou de l'angle aigu *nzs* (*fig.* 159), on a *nz* plus petite que *ns* ou *nk* (*fig.* 158), et *nz* plus grande que *ns* ou *nk* (*fig.* 159). Donc tous les rayons réfractés tomberont au-delà de *z* (*fig.* 158), ou en deçà (*fig.* 159).

(1) Barrow, *Lect. Opticæ et Geometr.*, p. 42, NN. 12, 13, 14, etc.

égal à *in*, ont leurs points de concours comme disséminés dans un petit espace voisin du point *d*, ensorte qu'il n'y a point alors de foyer proprement dit (1). La détermination du point qui est comme le centre d'action de tous ces rayons, de manière qu'ils peuvent être censés partir de ce point comme d'un point radieux, est un problème très-délicat qui a fort exercé les physiciens, et qu'ils ont résolu de différentes manières. Newton place ce point à peu près au milieu de la distance entre le point de concours *d* des rayons extrêmes, et le point *p* de l'axe (2).

Ce qui précède nous fournit l'explication de différens phénomènes dûs à la réfraction des milieux séparés par des surfaces planes. Nous nous bornerons au cas où la lumière passe d'un milieu plus dense dans un plus rare.

1138. Si l'on place un petit objet dans l'eau, et que l'œil soit situé verticalement au-dessus de cet objet, il en verra l'image à une distance de la surface de l'eau, qui ne sera que les trois quarts de la distance réelle ; car la première distance est à la seconde, d'après ce qui a été dit (1136), comme le sinus d'incidence est au sinus de réfraction, c'est-à-dire, comme 3 est à 4, quand la lumière passe de l'eau dans l'air.

En général, la réfraction des rayons qui passent dans l'air en sortant d'un milieu plus dense, dont la surface située du côté de l'œil est plane, fait voir l'image plus rapprochée de cette surface. Car si l'on suppose un point radieux situé en *a* (*fig.* 161), et que *tl* représente le diamètre de la prunelle, le point de concours imaginaire *d* des rayons réfractés *tn*, *li*, sera toujours situé dans l'intérieur du triangle *ban*, d'où il suit qu'il sera toujours plus près de l'œil que le point *a*.

1139. Placez un corps au fond d'un bassin vide, et que plusieurs personnes s'écartent du bassin jusqu'à ce que son bord leur cache le corps dont il s'agit : versez ensuite de l'eau dans

---

(1) Sgravesande, t. II, p. 766, n° 2701.

(2) Opuscul. XVIII, *Lectiones Opticæ*, *Scholium ad propos.* 8.

le bassin ; à l'instant le corps sera apperçu par tous les observateurs, dont on suppose que l'œil est resté fixe dans sa position.

Il suit encore de là qu'un bassin rempli d'eau paraît moins profond que quand il était vide, parceque tous les points de la surface du fond se rapprochent de l'œil.

1140. Si l'objet a une certaine longueur, telle que *ab* (*fig.* 162), et qu'il soit situé parallélement à la surface du milieu réfringent, sa longueur paraîtra augmentée ; car alors l'angle visuel *aob*, à l'aide duquel l'œil appercevrait l'objet *ab* à la vue simple, aura ses côtés compris entre ceux de l'angle *mon* sous lequel l'œil voit l'image de cet objet.

1141. Un bâton que l'on plonge en partie dans l'eau, sous une direction oblique à la surface de ce liquide, paraît rompu à l'endroit de son immersion, ensorte que l'image de la partie plongée se relève au-dessus de cette même partie. Car soit *ef* (*fig.* 163) la surface de l'eau, *ha* le bâton, et *o* la position de l'œil. Parmi tous les rayons que le point *a*, considéré comme point radieux, envoie vers la surface *ef*, il y en aura un tel que *an*, qui, après sa réfraction au point *n*, se dirigera vers l'œil, et lui fera voir l'image du point *a* quelque part en *x* ; d'où il suit que la partie plongée *ga* aura pour image une ligne *gx* qui fera paraître le bâton brisé au point *g*.

Concevons que le bâton, en restant fixe par l'extrémité *a*, se relève par l'extrémité opposée, jusqu'à ce qu'il coincide avec la ligne *ab* perpendiculaire sur *ef*, et supposons que l'œil soit toujours situé en *o* ; la grandeur apparente de la partie plongée sera égale à *xb*, beaucoup plus courte que la grandeur réelle *ab*. En général, un objet plongé verticalement dans l'eau paraît toujours raccourci, et cela d'autant plus que son extrémité supérieure se rapproche davantage de la surface de l'eau ; ensorte que le *minimum* a lieu, pour une même position de l'œil, lorsque l'extrémité supérieure de l'objet est de niveau avec le liquide.

Les choses étant dans ce dernier état, si l'on retire de l'eau l'objet dont il s'agit, et qu'il soit d'une forme déliée, on le

verra, avec une espèce de surprise, s'alonger comme par un développement rapide de toutes ses parties.

A mesure que l'objet sort de l'eau, on apperçoit, à l'aide de la réflexion, l'image de sa partie extérieure, et cette image est d'abord plus courte que celle de la partie intérieure, vue par réfraction ; mais comme cette dernière diminue, tandis que l'autre augmente, il y a un terme où elles sont de la même longueur. Or, l'image vue par réflexion est égale, dans tous les instans, à la partie de l'objet située hors de l'eau, ce liquide faisant ici l'office d'un miroir plan (1092). Supposons qu'au moment où les deux images ont la même longueur, on mesure la partie située hors de l'eau, et qu'ayant ensuite retiré tout-à-fait l'objet, on mesure aussi la partie qui était plongée dans l'eau. On pourra toujours déterminer, d'après le rapport entre l'une et l'autre, la quantité dont la partie plongée dans l'eau paraissait, par l'effet de la réfraction, plus petite qu'elle ne l'était réellement ; par exemple, si la partie située hors de l'eau est la moitié de la partie plongée, on en conclura que la longueur apparente de cette dernière partie était aussi la moitié de sa longueur réelle.

De la double Réfraction.

1142. Nous devons la connaissance du phénomène de la double réfraction (870) à Erasme Bartholin qui, ayant regardé l'image d'une ligne à travers un rhomboïde transparent de chaux carbonatée (spath calcaire), observa que cette image était double. Ce rhomboïde venait de l'Islande, où l'on en trouve qui sont d'une limpidité parfaite. Bartholin fut extrêmement surpris de l'observation dont nous venons de parler, et enchérissant, par l'imagination, sur ce qu'elle avait par elle-meme de merveilleux, il disait que ce phénomène enseveli dans l'Islande, où abondaient les corps destinés à le produire, offrait aux naturalistes la preuve d'une vérité jusqu'alors ignorée, savoir, que le froid des climats septentrionaux, loin d'affaiblir les rayons de la lumière, leur donnait, au contraire,

un nouveau degré d'énergie (1). La vérité est, que tous les climats fournissent de la chaux carbonatée transparente susceptible de doubler aussi les images des objets, et que beaucoup d'autres substances que nous citerons dans la suite partagent cette même propriété.

1143. L'explication de l'effet singulier dont il s'agit ici a exercé la sagacité de plusieurs savans distingués, à la tête desquels paraissent Huyghens et Newton ; et ce qui prouve la difficulté du sujet, c'est la variété des opinions entre tous ces savans, dont chacun, sans s'arrêter à ce qui avait été fait par les autres, essayait de se frayer une route particulière ; ensorte qu'au milieu de ce conflit d'autorités et de résultats sur un sujet qui a été retourné de tant de manières différentes, il paraît également difficile soit de choisir dans ce qui a été dit, soit de dire quelque chose de nouveau. Nous commencerons par décrire les principales circonstances du phénomène ; nous donnerons ensuite une idée des théories les plus remarquables parmi celles qui ont été imaginées pour l'expliquer, et nous ajouterons les résultats auxquels nous avons été conduits par nos recherches particulières, et qui nous ont servi de données soit pour apprécier ces théories, soit pour ébaucher celle qui nous paraît devoir donner la solution complète de ce problème si délicat.

Marche de la Lumière à travers un seul Rhomboïde.

1144. Concevons que *eb* (*fig.* 164) représente un rhomboïde de chaux carbonatée, dans lequel *a* et *n* soient les deux grands angles solides (2) ou ceux qui sont composés de trois

(1) *Erasmi Bartholini Experim. Cristalli Islandici disdiaclastici*; Hafniæ, 1770; *dedic. ad Regem Frider. III.*

(2) La position que l'on a donnée ici au rhomboïde, pour la facilité de la démonstration, fait paraître ces angles aigus, par une suite des règles de la projection.

angles plans obtus égaux entre eux (1) ; menons les petites diagonales *ae*, *bn*, des deux faces *hade*, *gbcn*, que nous regarderons comme les bases du rhomboïde, en les supposant situées horizontalement. Le quadrilatère *aenb* (*fig.* 164 et 165) formé par les petites diagonales des bases et par les arêtes intermédiaires *ab*, *en*, sera ce que nous appelons la section principale du rhomboïde.

1145. Soit *st* (*fig.* 164 et 165) un rayon de lumière qui tombe perpendiculairement sur la base supérieure du rhomboïde. Il se divisera au point d'immersion en deux parties, dont l'une *tl* sera sur le prolongement du rayon incident, comme dans le cas ordinaire, et l'autre *tf* s'écartera de la précédente, en se rejetant vers le petit angle solide *b*, c'est-à-dire, qu'il y aura une double réfraction du rayon de lumière.

1146. Nous appellerons désormais le rayon *tl*, *rayon ordinaire*, le rayon *tf*, *rayon d'aberration*, et la distance *fl* de l'un à l'autre, prise sur la base inférieure du rhomboïde, *amplitude d'aberration.*

1147. Si le rayon incident *st* tombe obliquement sur la surface du rhomboïde, il se divisera toujours en deux parties, dont l'une, qui sera le rayon ordinaire, se réfractera en se rapprochant de la perpendiculaire au point d'immersion, suivant une loi analogue à celle des réfractions communes, et qui est telle que le sinus de réfraction est à celui d'incidence constamment comme 3 à 5; l'autre partie, qui sera le rayon d'aberration, s'écartera toujours de la précédente, pour se rapprocher de l'angle *b*, quelle que soit la direction du rayon incident. Nous verrons dans la suite quelle est la loi de cette seconde réfraction.

1148. Si le rayon incident est dans le plan de la section principale *aenb*, le rayon ordinaire et le rayon d'aberration seront aussi l'un et l'autre dans ce même plan : toutes les théories sont d'accord sur ce résultat.

---

(1) La valeur de chacun de ces angles est de $101^d.\ 32'\ 13''$, en conséquence de ce que le rapport entre les diagonales du rhombe est celui de $\sqrt{3}$ à $\sqrt{2}$.

Marche

Marche de la Lumière à travers deux Rhomboïdes superposés.

Supposons à présent qu'un rayon de lumière traverse deux rhomboïdes situés l'un au-dessus de l'autre. Si les sections principales coincident dans le même plan, ou sont respectivement parallèles, soit que leurs bords latéraux *ab*, *en*, s'inclinent dans le même sens, ou en sens contraire, comme on le voit (*fig.* 166), chacun des rayons ordinaire et d'aberration qui seront sortis du premier rhomboïde, ne se décomposera pas en passant dans le second, mais s'y réfractera suivant la même loi que dans le premier.

1149. Si les deux rhomboïdes sont tellement disposés que leurs sections principales se croisent à angle droit, alors chacun des deux rayons sortis du premier rhomboïde restera encore simple en pénétrant dans le second; mais ces rayons changeront de fonction, c'est-à-dire, que celui qui était rayon ordinaire dans le premier rhomboïde, se dirigera dans le second comme rayon d'aberration, et réciproquement.

Mais dans toutes les positions intermédiaires, c'est-à-dire, dans celles où les sections principales seront inclinées entre elles, chacun des deux rayons sortis du premier rhomboïde se partagera de nouveau dans le second, en un rayon ordinaire et un rayon d'aberration, qui se dirigeront conformément à l'incidence du rayon dont ils seront les soudivisions. Ces résultats intéressans sont de Newton (1).

Il est à remarquer que les rayons d'aberration ont cela de commun avec les rayons ordinaires, qu'en repassant du rhomboïde dans l'air par une face parallèle à celle par laquelle ils étaient entrés, ils prennent une direction qui est elle-même parallèle à celle du rayon incident.

(1) *Optice Lucis*, lib. III, quæst 25.

Duplication des Images, à l'aide d'un seul Rhomboïde.

Il est facile d'expliquer, d'après les mêmes résultats, les phénomènes qui ont lieu lorsqu'on regarde un objet à travers un rhomboïde, ou à travers deux rhomboïdes superposés.

1150. Considérons d'abord le premier cas, et supposons pour plus de simplicité, que *aenb* (*fig.* 167) étant la coupe principale du rhomboïde, il y ait un point visible *p* placé à une certaine distance en dessous du rhomboïde, et un œil situé en *s*, au-dessus de la base supérieure. Parmi tous les rayons que le point *p* envoie vers le rhomboïde, il y en a un, tel que *pl*, dont la partie *lt*, considérée comme rayon ordinaire, après avoir repassé dans l'air, parvient à l'œil suivant une direction *ts*, parallèle à *pl*. L'autre partie qui est le rayon d'aberration, prend une direction telle que *lz*, en se rejetant vers l'angle aigu *e*; et comme après son émergence en *z*, suivant une ligne *zx*, ce rayon redevient parallèle à *pl*, il est perdu pour l'œil. Maintenant, entre tous les autres rayons qui partent du point *p*, il y en a un second, dont la direction *po* se rapproche tellement de *pl*, que *or* étant le rayon ordinaire qui en provient, le rayon d'aberration *ou* croise le rayon *lt* au point *k*, et, après son émergence en *u*, suit une direction *us* parallèle à *po*, et qui va aboutir à l'œil. On conçoit que cette supposition est toujours possible, puisque l'on est le maître de prendre le rayon *po* sous telle inclinaison que l'on voudra par rapport à *pl*. L'œil verra donc deux images du point *p*, l'une sur la direction *st*, et qui sera l'image ordinaire; l'autre sur la direction *su*, et qui sera l'image d'aberration. Quant au rayon *or*, il est évident, qu'à cause de son parallélisme avec *po*, après son émergence en *r*, suivant une ligne telle que *rm*, il ne peut passer par l'œil.

A mesure que le point *p* se rapprochera de la ligne *bn*, le point *k* descendra vers cette même ligne; et lorsque le point *p*

touchera *bn*, le point *k* se confondra avec lui, de manière que la double image subsistera toujours.

1151. Il est remarquable que l'une des deux images, savoir, celle qui est vue sur la direction *su*, et qui est produite par le rayon d'aberration, paraisse toujours plus éloignée que l'autre de la base supérieure du rhomboïde. On peut rendre très-sensible cette différence de distance, en traçant un cercle sur un papier, et en observant, à travers le rhomboïde, les deux images de ce cercle qui se croiseront, en même temps que l'une sera vue dans une position inférieure à celle de l'autre.

1152. Dans l'expérience représentée par la *figure* 167, l'image d'aberration, vue sur la direction *su*, paraît plus voisine de l'angle obtus *n* que l'image ordinaire, dont le lieu est sur la direction *st*, ce qui est l'effet inverse de celui que présentent les rayons ordinaire et d'aberration provenus d'un même rayon incident : cette inversion est une suite du croisement des rayons *ou* et *lt* au point *k*.

Cette même marche des rayons par des directions croisées sert à expliquer une expérience intéressante, qui est due au célèbre Monge. Prenez le rhomboïde en appliquant l'index sur l'arête *ab* (*fig* 164) et le pouce sur l'arête *en*, et placez sa base supérieure *adeh* le plus près possible de l'œil, de manière que l'une des deux images du point *p* soit située en arrière de l'autre, par rapport à vous. Alors faites glisser doucement, en dessous du rhomboïde, une carte qui, restant appliquée à la base inférieure, s'avance de *b* vers *n*, jusqu'à ce qu'elle cache une des deux images. Vous remarquerez, avec surprise, que cette image, dont la carte vous dérobe d'abord la vue, n'est point celle qui est située du côté où vient la carte, mais celle qui est de votre côté. On conçoit, à la seule inspection de la *figure* 167, que l'arête *en* étant celle qui regarde l'observateur, la carte qui s'avance de *b* vers *o* doit d'abord intercepter le rayon incident *po*, auquel appartient le rayon émergent *su*, qui produit l'image la plus voisine de l'observateur.

Variation dans le nombre des Images, à l'aide de deux Rhomboïdes superposés.

1153. Les changemens que les rayons subissent dans leurs fonctions, lorsqu'on emploie deux rhomboïdes, en occasionnent d'analogues dans la duplication des images, ainsi que l'on peut s'en convaincre au moyen de l'expérience suivante, qui n'a besoin que d'être exposée.

Après avoir mis les deux rhomboïdes en contact par une de leurs bases, posez-les sur un papier marqué d'un point d'encre. Si les faces homologues des deux rhomboïdes sont respectivement parallèles, l'œil ne verra que deux images d'un même point, comme s'il n'y avait qn'un seul rhomboïde : seulement elles seront plus écartées l'une de l'autre. Les choses étant dans cet état, faites tourner doucement le rhomboïde supérieur au-dessus de l'inférieur. Bientôt vous verrez paraître deux nouvelles images qui d'abord seront très-faibles, et ensuite augmenteront peu à peu d'intensité; en même temps les deux premières images s'affaibliront par degrés, et finiront par disparaître, ce qui arrivera avant que le rhomboïde mobile ait fait un quart de révolution : passé ce terme, si vous continuez de le faire tourner, les mêmes effets auront lieu dans un ordre inverse ; c'est-à-dire, que les deux premières images reparaîtront, et que leur teinte, d'abord légère, se renforcera peu à peu, tandis que les deux autres diminueront d'intensité, jusqu'à ce qu'elles deviennent nulles vers la fin de la demi-révolution du rhomboïde mobile (1). Alors les coupes principales étant tournées en sens contraire, mais toujours sur un même plan, comme le représente la *figure* 166, l'œil ne verra plus que deux images, mais beaucoup plus rapprochées que dans le premier cas; il n'en verrait même qu'une seule, si les

(1) Tous ces différens faits sont sujets à quelques exceptions, lorsque le rayon visuel est très-oblique et prend certaines positions; car alors on ne voit que deux images dans le cas où on devrait en voir quatre, et réciproquement.

deux rhomboïdes étaient exactement de même hauteur. Si vous achevez la révolution du rhomboïde supérieur, les effets précédens reparaîtront en suivant de même une marche rétrograde.

Nous n'avons considéré jusqu'ici que les résultats d'observations qui s'offrent comme d'eux-mêmes à un œil un peu attentif. Il s'agit maintenant d'examiner les opinions entre lesquelles les physiciens se sont partagés sur la détermination précise de la loi à laquelle est soumis le phénomène, et sur la cause physique dont il dépend.

Théorie d'Huyghens, sur la double Réfraction.

1154. Huyghens, qui faisait consister en général la propagation de la lumière dans des espèces d'ondulations d'une figure circulaire, avait ramené à cette considération la loi de la réfraction ordinaire; et pour expliquer la double réfraction qui avait lieu dans la chaux carbonatée, il supposait que la lumière, en pénétrant un rhomboïde de cette substance, y produisait des ondulations de deux figures, l'une circulaire comme dans les autres corps, l'autre elliptique, particulière au cas présent; et c'était à ces dernières ondulations qu'il attribuait la réfraction du rayon d'aberration (1). Il manie cette hypothèse avec beaucoup d'art, ensorte que les valeurs qui s'en déduisent, relativement aux angles d'incidence et de réfraction du rayon d'aberration, nous ont paru, en général, se rapprocher de la vérité. Huyghens était même parvenu à un résultat très-remarquable que nous ferons connaître dans la suite, mais qui s'adapte également à une théorie fondée sur l'émission de la lumière en ligne droite.

Théorie de Newton.

Ce grand géomètre qui, comme nous l'avons vu, adoptait ce mouvement rectiligne de la lumière (842), et qui faisait dé-

(1) *Christiani Hugenii Opera reliqua*; Amstelod., 1728, t. I. *Tractatus de Lumine*, p. 39 et seq.

pendre la réfraction ordinaire de l'attraction qu'exercent sur les molécules de ce fluide les milieux réfringens (897), attribuait aussi la réfraction d'aberration à une force attractive, mais qui était particulière à la substance même de la chaux carbonatée, et avait son centre d'action situé vers le petit angle solide du rhomboïde; et voici la détermination à laquelle cet illustre géomètre avait été conduit, relativement à la loi du phénomène.

1155. Supposons que *st* (*fig.* 165) soit toujours un rayon incident perpendiculaire à la base du rhomboïde, et situé dans le plan de la coupe principale *aenb*. Le rayon ordinaire étant *tl*, situé sur le prolongement de *st*, le rayon d'aberration qui se rejettera nécessairement vers le petit angle solide *b*, sera situé comme *tf*, qui fait avec *tl* un angle de $6^{d}.\ 40'$. Or, l'amplitude d'aberration *fl*, donnée par cette incidence, avait également lieu, suivant Newton, pour toutes les inclinaisons du rayon *st*, soit qu'il restât dans le plan de la coupe principale, ou qu'il s'en écartât; d'où il résultait que l'amplitude d'aberration était constante, non-seulement quant à sa longueur, mais aussi quant à sa direction, qui était toujours parallèle à la petite diagonale *bn* de la base du rhomboïde.

Diverses autres Théories.

1156. D'autres physiciens ont cru pouvoir ramener la réfraction du rayon d'aberration aux lois ordinaires, et voici les principes d'où l'on part dans cette hypothèse. Parmi tous les rayons incidens qui peuvent rencontrer obliquement la base supérieure du rhomboïde, il y en a un, tel que *s't'*, qui est tellement situé que le rayon d'aberration *t'f'* qui en provient, est sur son prolongement, c'est-à-dire, qu'alors la réfraction d'aberration devient nulle, ensorte que l'image d'aberration donnée par un point *f'* placé en dessous du rhomboïde, est vue à sa vraie place. Cette circonstance a lieu lorsque le rayon incident *s't'* est parallèle, à environ deux degrés près, aux arêtes *ab*, *en*. Menons *t'p* perpendiculaire sur *s't'*, et supposons

un plan qui passe par $t'p$, et dont la section sur la base supérieure du rhomboïde fasse un angle droit avec la diagonale ae. Il est évident qu'il en sera de ce plan, à l'égard du rayon $s't'$, comme des plans ordinaires par rapport aux rayons qui subissent les lois de la réfraction commune, puisque les rayons qui passent sans inflexion sont toujours perpendiculaires à ces plans.

1157. Lahire, qui avait mesuré les angles d'incidence et de réfraction du rayon d'aberration, relativement à un plan situé comme celui dont nous venons de parler, avait trouvé que le rapport entre les sinus était à peu près celui de 3 à 2, comme quand la lumière passe de l'air dans le verre; et ce rapport lui ayant paru constant, il en avait conclu que la réfraction des rayons d'aberration devait être assimilée à celle des rayons ordinaires, excepté que le plan auquel elle se rapportait avait une position différente (1).

1158. Plusieurs des physiciens qui ont adopté la même opinion, entre autres le célèbre Buffon (2), ont pensé qu'un rhomboïde de chaux carbonatée était composé de couches entrecroisées de deux densités diverses. Pour que cette hypothèse s'accordât avec l'observation, il fallait que, parmi ces couches, les unes s'étendissent parallélement à la base du rhomboïde, et les autres parallélement au plan qui passe par $t'p$. Lorsqu'un faisceau de lumière tombait sur la surface du rhomboïde, les rayons dont il était composé rencontraient, les uns des molécules de la matière la plus dense, et les autres des molécules de celle qui était plus rare, d'où résultaient deux réfractions particulières, dont chacune était soumise aux lois ordinaires.

1159. Mais cette hypothèse a contre elle un fait qu'il est très-facile de vérifier. Car si l'on regarde à travers le rhomboïde un point visible, en plaçant l'œil de manière que le rayon visuel soit perpendiculaire à la base de ce rhomboïde, l'image ordinaire du point dont il s'agit sera vue sans déplacement,

(1) Mémoires de l'Académie des Sciences; 1710.

(2) Histoire Nat. des Minéraux; édit. in-12, t. VII, p. 157 et suiv.

c'est-à-dire, qu'elle paraîtra sur le prolongement du rayon visuel qui, dans ce cas, fera la fonction d'un rayon incident situé perpendiculairement à la surface du milieu réfringent. Or, dans l'hypothèse dont nous avons parlé, le rayon qui, en partant du point visible, apporterait à l'œil l'image de ce point, subirait continuellement des inflexions à mesure qu'il rencontrerait obliquement les diverses couches parallèles au plan qui passe par $t'p$; d'où il suit que l'image du point visible ne pourrait être apperçue à sa vraie place.

Observations sur les Théories d'Huyghens et de Newton.

1160. La propagation de la lumière en ligne droite fournit des explications si heureuses de phénomènes qui dépendent de la réfraction ordinaire, que cette seule considération suffirait pour rendre douteuse l'hypothèse d'Huyghens sur la figure elliptique des ondes de lumière auxquelles ce savant attribue la réfraction d'aberration. La loi qu'il en déduit nous a paru d'ailleurs souffrir des exceptions dans plusieurs cas, lorsque nous avons essayé de la vérifier. Mais Huyghens semble avoir dicté lui-même le jugement que l'on doit porter de son hypothèse, en avouant avec franchise l'embarras où il était pour y ramener les résultats des observations faites avec deux rhomboïdes (1153), dans lesquelles les rayons, tantôt ne font que changer de fonction, et tantôt se subdivisent de nouveau, en passant d'un rhomboïde dans l'autre (1).

On est bien plus porté à se ranger encore ici du côté de Newton, lorsque l'on considère la grande simplicité de la loi admise par ce célèbre géomètre pour la réfraction du rayon d'aberration. D'ailleurs cette loi est liée à une cause physique que nous exposerons plus bas, et qui fournit une explication heureuse de ce phénomène qui avait arrêté Huyghens. Mais

(1) *Quo autem pacto id fiat, nihil reperire potui, quod mihi satisfaceret. Tractatus de Lumine*, p. 69.

cette même loi ne s'accorde pas avec les résultats des expériences que nous allons rapporter, et qui ont cet avantage, qu'il n'y a personne qui ne puisse facilement les répéter, et s'assurer de leur exactitude.

1161. Si l'on pose un rhomboïde de chaux carbonatée sur un papier marqué de deux points, et que l'on fasse varier les distances respectives de ces points, sous une position déterminée de l'œil, on trouvera qu'il y a un terme où au lieu de quatre images on n'en voit plus que trois; dans ce cas, deux des premières images se réunissent en une seule, d'une teinte plus foncée.

Si en même temps l'œil est dans le plan *abne* (*fig.* 164), il faudra, pour que cet effet ait lieu, que les deux points soient sur la diagonale *bn*.

Si l'œil s'écarte ensuite de la position où il voyait deux images se confondre, celles-ci se sépareront, et cela d'autant plus que la position de l'œil changera davantage; et il faudra, pour les voir de nouveau coincider, augmenter la distance entre les deux points, si le rayon visuel, en variant son inclinaison, s'est rapproché du point *e*, et diminuer cette distance, si le rayon visuel s'est incliné en sens opposé vers le point *a*. Nous supposons toujours que ce rayon ne sorte pas du plan *abne*, auquel cas il est nécessaire, pour ramener les quatre images à n'en faire plus que trois, de laisser toujours les deux points sur la direction de la diagonale *bn*.

1162. Il n'en sera pas de même si le rayon visuel sort du plan *abne*. Voici ce que nous avons observé à cet égard : soit *bn* (*fig.* 168) la même diagonale que *fig.* 164, et soient *p*, *r* les deux points visibles. Concevons que le rayon visuel étant d'abord incliné vers *e*, et situé dans le plan *abne* (*fig.* 164), l'œil fasse un mouvement circulaire en allant de *e* vers *h*; l'observateur ne pourra voir coincider deux des images qu'en plaçant les points *p*, *r* (*fig.* 168) sur une direction inclinée à la diagonale. Supposons que le point *p* reste fixe; il faudra placer le point *r* à la droite de la diagonale, comme en *r'*; tandis que le rayon visuel s'approchera de plus en plus d'un

plan qui couperait à angle droit la section principale, la distance nécessaire entre le point r' et la diagonale bn augmentera : elle sera la plus grande possible, lorsque le rayon visuel se trouvera dans le plan dont nous venons de parler. Au-delà de ce plan, en allant de h vers a (*fig.* 164), il faudra diminuer la distance, en laissant toujours le point r' (*fig.* 168) sur une oblique qui diverge du côté de n, par rapport à la diagonale. La distance deviendra nulle, lorsque le rayon visuel tombera de nouveau, mais en sens contraire, dans le plan $abne$ (*fig.* 164). Si ce rayon continue sa révolution en allant de a vers d, les mêmes effets auront lieu dans un ordre opposé, c'est-à-dire que, pour obtenir la coïncidence des images, il faudra placer le point r de l'autre côté de la diagonale, comme en r'' (*fig.* 168).

1163. Maintenant soit st (*fig.* 169) un rayon de lumière qui tombe, suivant une direction quelconque, sur la base supérieure du rhomboïde. Soit tr le rayon ordinaire, et tp le rayon d'aberration, auquel cas pr sera l'amplitude d'aberration ; soient pp', rr' les rayons émergens qui, d'après ce qui a été dit, seront parallèles à st. Au lieu du rayon st, supposons deux points visibles, l'un en r' et l'autre en p', qui envoient des rayons vers le rhomboïde, dans toutes sortes de directions. Il est évident que parmi tous ces rayons, celui qui suivra la direction $r'r$ se divisera au point d'émergence, de manière que rt sera encore le rayon réfracté ordinaire ; car, à cause du parallélisme des rayons st, $r'r$ considérés successivement comme rayons incidens, le rayon réfracté rt fera exactement la même fonction à l'égard de l'un et de l'autre. Par une raison semblable, le rayon qui suivra la direction $p'p$ se décomposera dans le rhomboïde, de manière que le rayon d'aberration sera encore pt.

La proposition sera toujours vraie, quelles que soient les positions des points visibles le long des lignes $r'r$, $p'p$; d'où il suit que si l'on suppose l'un en r et l'autre en p, pts et rts seront les routes des rayons qui arriveront en s, et tout se passera encore comme dans l'hypothèse du rayon incident st.

Les choses étant dans cet état, supposons un œil placé en *s*, cet œil verra deux des quatre images données par les deux points se confondre sur la direction *st*. Donc toutes les fois que cette réunion a lieu, la distance *pr* entre les deux points est l'amplitude d'aberration, relativement à un rayon incident qui aurait la direction sous laquelle l'œil voit l'image unique formée par la réunion dont on a parlé.

Or, nous avons vu qu'il était nécessaire, dans ce cas, de changer la distance entre les deux points, à mesure que la position du rayon visuel variait elle-même ; d'où il suit que l'amplitude d'aberration n'est pas une quantité constante, comme Newton l'avait pensé.

1164. Elle n'est pas non plus constamment parallèle à la petite diagonale *bn* ; car nous avons vu que quand le rayon visuel n'était pas dans le plan *abne* (*fig* 164) (et il en faut dire autant de tout autre plan parallèle à celui-ci), on ne pouvait faire concourir deux images en une seule, qu'en plaçant les deux points visibles sur une ligne inclinée à la diagonale. Donc, dans tous les cas de ce genre, l'amplitude d'aberration, qui mesure la distance entre les deux points, fait elle-même un angle avec la diagonale.

Il paraît que Newton ayant fait ses expériences avec des rhomboïdes d'une hauteur peu considérable, et n'ayant pu mesurer avec assez de précision les distances et les positions des rayons de lumière qu'il introduisait immédiatement à travers ces corps, aura été entraîné par l'extrême simplicité de la loi qui semblait s'offrir à son observation.

Détermination approximative de la Loi du Phénomène.

Nous avons essayé de déterminer la véritable direction des rayons qui produisent la réfraction d'aberration, mais seulement pour les cas où ce rayon est situé dans le plan *abne*, le temps ne nous ayant pas permis de poursuivre plus loin ce

travail. Nous allons faire connaître, au moyen d'une construction facile à saisir, le résultat auquel nous sommes parvenus, en ne le donnant que pour une manière approchée de représenter la marche du phénomène.

1165. Nous avons vu (1145) que quand le rayon incident *st* (*fig.* 164) était perpendiculaire sur *adeh*, auquel cas le rayon ordinaire continuait sa route dans le rhomboïde, le rayon d'aberration se rejetait vers le petit angle solide *b*. Supposons que la ligne *ax* (*fig.* 170), abaissée de l'angle *a* perpendiculairement sur la diagonale *bn*, représente le rayon ordinaire. Dans ce cas, si l'on prend *xy* égale au tiers de *bx*, et que l'on mène *ay*, cette dernière ligne représentera le rayon d'aberration relatif à l'incidence perpendiculaire sur *ae*.

Soit maintenant *st* un rayon incident oblique sur *ae*, et *tl* le rayon réfracté ordinaire, dont il est facile de déterminer la position d'après le rapport 5 à 3 entre les sinus. On demande la position du rayon d'aberration *tf*.

Par le pied de la ligne *ax*, menez *xo*, qui fasse, avec *ax*, un angle de 60$^{d.}$; puis par le pied du rayon ordinaire *tl*, menez *lm* parallèle à *xo*. Prenez sur *lm* la partie *lu* égale à *xz*. La ligne *tf*, menée par le sommet du rayon ordinaire et par le point *u*, sera la direction du rayon d'aberration relatif à l'incidence suivant *st*.

Si l'on suppose que l'incidence ait lieu en sens contraire, suivant une direction *s' t'*, alors le rayon ordinaire étant représenté par *t' l'*, le rayon d'aberration *t' f'* sera encore situé entre le précédent et l'angle *b* ; et l'on aura l'amplitude d'aberration par une construction semblable à celle que nous avons indiquée relativement au rayon incident *st* (1).

1166. On voit par là que *lu* ou *l' u'* est une constante ; mais l'amplitude *lf* ou *l' f'* est nécessairement une variable. Si l'on suppose que les deux incidences *st*, *s' t'* soient égales en sens

(1) Nous avons donné une formule générale qui exprime ce résultat, dans les Mémoires de l'Académie des Sciences ; 1788, p. 45. *Voyez* aussi le Traité de Minéralogie, t. II, p. 45.

contraire, on aura $f'l'$ plus petite que fl, de manière que leur somme sera double de l'amplitude xy relative à l'incidence perpendiculaire. Cette somme est donc elle-même une quantité constante. Huyghens avait déduit ce même résultat des propriétés de l'ellipse dont il attribuait la figure aux ondes de lumière, qui produisaient, selon lui, la réfraction ordinaire. Mais dans la théorie que nous proposons, ce résultat se trouve ramené aux propriétés des lignes droites, et il est même démontré qu'il a toujours lieu, quelle que soit la valeur des angles bxo, xay, pourvu que l'on prenne lu ou $l'u'$ égale à zx. Parmi tous les cas possibles, nous avons choisi celui qui nous a paru s'adapter le mieux à l'observation, et il est remarquable que ce cas soit celui où la ligne ox fait avec ax un angle de $60^{d.}$, tandis qu'elle fait avec ao un angle qui est à très-peu près de $101^{d.}\frac{1}{2}$, c'est-à-dire, égal au grand angle du rhombe primitif (1).

---

(1) Concevons que l'on applique $t'l'$ sur tl, en renversant la base $f'l'$ du triangle $l't'f'$, de manière que le point f' tombe sur le point c, de l'autre côté du rayon tl, et le point u' sur le point p. Si l'on mène lp et up, cette dernière ligne sera évidemment parallèle à bn, à cause de l'égalité des angles ulf, plc, et de celle des lignes lu, lp. De plus, la ligne fc sera égale à la somme des deux distances $lf + l'f'$. Or, si l'on suppose que le rayon tl change d'inclinaison, en restant fixe par son extrémité l, les lignes tc, tf, dans l'hypothèse de lu, lp constantes, resteront fixes elles-mêmes par leurs points p, u, tandis que leurs extrémités supérieure et inférieure feront un mouvement le long des lignes ae, bn. Donc, dans tous les cas, on aura $tp : tc :: up : fc$. Mais il est aisé de voir qu'à cause des parallèles ae, up, bn, le rapport $\frac{tp}{tc}$ est constant, donc aussi le rapport $\frac{up}{fc}$ sera constant; et puisque up est constante, fc le sera pareillement. Or, plus le rayon tl approche d'être parallèle à la perpendiculaire tm, plus aussi lf approche d'être égale à xy, Donc si l'on suppose que la direction tl diffère infiniment peu de la perpendiculaire, on pourra faire la ligne fc ou la somme des deux lignes fl, $f'l'$ égale à $2xy$. Donc, puisque cette somme est constante, elle sera le double de xy dans tous les cas. On voit que cette démonstration est indépendante de la position de la ligne ox, ou de l'angle qu'elle fait avec la diagonale bn.

Explication de la Différence entre les Distances des deux Images par rapport à l'Œil.

1167. Les observations sur lesquelles est fondée la même théorie nous ont paru fournir une explication satisfaisante d'un fait remarquable que nous avons déjà cité, et qui consiste en ce que l'image produite par le rayon d'aberration est toujours plus enfoncée que l'autre en dessous de la base supérieure du rhomboïde.

Pour concevoir la raison de cette différence, remarquons d'abord que les rayons à l'aide desquels on voit l'image d'un point situé derrière un milieu diaphane, forment un cône, dont la base est contiguë à la surface du milieu la plus voisine de l'œil. Au-dessus de cette surface, ils se replient vers l'œil, par l'effet de la réfraction, en formant un cône tronqué, dont la plus petite base se confond avec la base du premier cône, et dont l'autre base, qui est plus dilatée, a un diamètre égal à celui de la prunelle par laquelle les rayons entrent dans l'œil.

Quelque opinion que l'on adopte sur la distance précise à laquelle on apperçoit l'image vue par réfraction (1137), il est certain que, toutes choses égales d'ailleurs, cette distance est plus grande, lorsque les deux diamètres des bases du cône tronqué diffèrent moins entre eux, ce qui fait que le sommet du même cône prolongé par l'imagination derrière la surface réfringente, est plus éloigné de cette surface.

1168. Cela posé, concevons que *an* (*fig.* 171) représente toujours le même rhomboïde, et que *p* étant un point visible situé sur la base inférieure, *pkosr* soit le cône brisé, à l'aide duquel l'œil apperçoit en *p'* l'image ordinaire du point *p*. Nous supposons d'abord cet œil situé de manière que le rayon visuel se trouve dans le plan de la section principale. Tous les rayons d'aberration qui correspondent aux rayons ordinaires, dont le cône *pkosr* est l'assemblage, sont perdus pour l'œil, d'après

ce qui a été dit plus haut. Mais il y a un second cône (1) formé par d'autres rayons d'aberration, à l'aide duquel l'œil voit l'image d'aberration du point *p*, et de même tous les rayons ordinaires correspondans sont perdus pour l'œil.

Prenons dans le cône *kpo* les deux rayons *pk*, *po*, qui aboutissent à l'extrémité du diamètre situé perpendiculairement à la diagonale *ae*, et rétablissons pour un instant les deux rayons d'aberration qui leur correspondent : il est facile de voir que ces derniers rayons doivent se trouver aux extrémités *n*, *l* de deux lignes obliques par rapport à la diagonale *ae* puisque dans ce cas les amplitudes d'aberration divergent à l'égard de cette diagonale, ainsi qu'il a été dit plus haut (1164). Donc si l'œil était placé de manière à recevoir ces mêmes rayons qui sont perdus pour lui, leur distance *nl* étant plus grande que la distance *ko*, le point de concours imaginaire de ces rayons, derrière la surface *adeh*, serait plus éloigné que celui des rayons ordinaires *kr*, *os*.

Concluons de là que les lois suivant lesquelles se réfractent les rayons d'aberration, tendent, en général, à rendre la distance entre ces rayons, pris de deux côtés opposés, plus grande que celle entre les rayons ordinaires, pris d'après la même condition.

Or, cette augmentation de distance, que nous venons de trouver en comparant ensemble les rayons ordinaires qui composent le cône *pkosr* et les rayons d'aberration correspondans, devant toujours avoir lieu, proportion gardée, pour les autres rayons d'aberration qui sont à portée de l'œil, et lui font voir l'image d'aberration, il en résulte que la réfraction d'aberration tend à élargir la plus petite base du cône tronqué, plus que ne fait la réfraction ordinaire. Donc, si l'on suppose ce cône prolongé derrière la surface réfringente, le point de son axe, relativement auquel toutes les directions se compensent, doit se trouver plus reculé par rapport à l'œil et à la surface

(1) Nous n'avons point représenté ici ce second cône, pour ne pas trop compliquer la figure.

réfringente, que le point correspondant du cône formé par les rayons ordinaires. Donc le lieu apparent de l'image d'aberration sera aussi plus éloigné que celui de l'image ordinaire.

1169. Si l'on conçoit que le rayon visuel soit incliné en sens contraire vers le point a, on aura des conclusions analogues, en appliquant le raisonnement que nous venons de faire.

Si le rayon visuel sort de la section principale et se rejette de côté, de manière que, par exemple, il se rapproche du point h, alors $k'o'$ (*fig.* 172) étant la base inférieure du cône tronqué, les lignes $k'n'$, $o'l'$, s'inclineront dans le même sens. Mais la ligne $o'l'$ s'écartera davantage que la ligne $k'n'$ de la direction parallèle à ae ; d'où il suit que l'on aura encore $n'l'$ plus grande que $k'o'$, quoique dans un moindre rapport que quand le rayon visuel coincidait avec la section principale. L'image d'aberration sera donc vue aussi, dans ce cas, plus loin que l'image ordinaire ; mais la différence des distances sera moins sensible que dans le premier cas, ce qui nous a paru conforme à l'expérience.

Observations sur la double Réfraction de divers Corps naturels.

1170. La double réfraction considérée relativement aux différentes substances naturelles qui partagent cette propriété semble être soumise à certaines conditions déterminées par les formes primitives de ces substances. Jusqu'ici la chaux carbonatée et le soufre sont les seules, parmi ces substances, qui présentent deux images du même objet vu à travers deux de leurs faces parallèles, ce qui nous paraît provenir de ce que leurs formes primitives sont des parallélipipèdes obliquangles, au lieu que les autres dérivent d'un solide dans lequel les bases sont à angle droit sur les faces latérales. Pour appercevoir la double image, à l'aide de ces dernières, il est nécessaire que les deux faces à travers lesquelles on regarde les objets soient inclinées l'une sur l'autre ; mais il peut arriver que,

que, même dans ce cas, l'effet de la double réfraction devienne nul, et que les deux images se confondent en une seule. Cette limite a lieu lorsque l'une des deux faces qui forment l'angle réfringent est ou perpendiculaire ou parallèle à l'axe de la forme primitive, ce qui dépend de la nature des substances. Ainsi dans l'émeraude, c'est la première position qui détermine la réunion des deux images en une seule, et dans la baryte sulfatée (spath pesant), c'est la seconde.

1171. A l'égard de la chaux carbonatée, qui fait voir en général la double image d'un objet à travers deux faces parallèles, on peut, en conservant le parallélisme, amener les choses au terme où l'image paraisse simple. Il faut pour cela tailler un rhomboïde de cette substance, de manière à faire naître deux faces triangulaires, qui interceptent les deux angles solides obtus *a*, *n* (*fig.* 164), et soient perpendiculaires à l'axe qui passe par ces angles. L'image d'un point vu à travers ces deux faces paraîtra simple, pourvu que le rayon visuel soit perpendiculaire à ces mêmes faces, et que le point soit situé sur sa direction; car si l'œil s'écarte d'un côté ou de l'autre, les deux images qui coincidaient en une seule se sépareront.

Pour concevoir la raison de cet effet, il faut remarquer que dans le cas où l'image paraît simple, par une suite des conditions que nous venons d'indiquer, le rayon de lumière qui part du point visible ne pourrait se soudiviser dans l'intérieur du rhomboïde, qu'autant que sa partie d'aberration se rejeterait de préférence vers quelqu'un des angles solides aigus *e*, *c*, *g*. Mais la position de cette partie étant la même relativement à ces trois angles, il en résulte pour elle une espèce d'équilibre, de manière qu'elle continue sa route conjointement avec le rayon perpendiculaire qui appartient à la réfraction ordinaire, et ainsi l'œil voit les deux images se confondre en une seule; mais elles se séparent, dès que l'œil venant à s'écarter de la perpendiculaire, le rayon incident qui lui fait voir l'image d'aberration est forcé de prendre, en traversant le rhomboïde, une position inclinée, qui tend davantage vers l'un des angles *c*, *c*, *g* que vers les deux autres.

1172. Une observation que nous ne devons pas omettre, consiste en ce que toutes les substances minérales dont la forme primitive est remarquable par un caractère particulier de régularité, ont la réfraction simple. Telles sont celles qui donnent pour résultat de leur division mécanique, le cube, l'octaèdre régulier et le dodécaèdre à plans rhombes, qui se rapproche beaucoup des deux solides précédens, par la symétrie de sa forme.

Idée de Newton sur la Cause physique de la double Réfraction.

1173. Il ne nous reste plus qu'à donner un apperçu de la cause physique d'où dépend le phénomène. Quoique celle qu'a imaginée Newton paraisse singulière au premier abord, plus on l'étudie, et plus on trouve qu'elle gagne à être examinée de près, et comparée avec les faits observés.

Ce grand géomètre supposait que les molécules de la lumière avaient deux espèces de pôles, sur lesquels la matière de la chaux carbonatée exerçait une action particulière, dont le centre était placé dans la région du petit angle solide. D'après cette idée, il considérait chaque rayon simple comme un prisme quadrangulaire infiniment délié, dans lequel tous les pôles dont nous venons de parler étaient rangés sur deux pans opposés, que nous appellerons *pans d'aberration*. Lorsque le rayon, en pénétrant le rhomboïde, par exemple en allant de la base supérieure *adeh* vers l'inférieure *bcng*, présentait l'un de ces mêmes pans à l'angle solide *b*, la force dont il s'agit l'attirait à elle, tandis que quand il présentait à l'angle *b* l'un des deux autres pans que l'on peut appeler *pans de refraction ordinaire*, la matière du rhomboïde n'avait sur lui d'autre action que celle qui lui était commune avec les milieux ordinaires.

Cela posé, parmi tous les rayons simples dont est formé un faisceau de lumière qui tombe sur la surface du rhomboïde, les uns auront leurs pans de refraction ordinaire, et les autres leurs pans d'aberration tournés vers le petit angle solide. Le

faisceau se divisera donc en deux parties, dont l'une ne subira que la réfraction ordinaire, tandis que l'autre, attirée par la force qui réside dans le petit angle solide, sera soumise à la réfraction d'aberration.

1174. Cette hypothèse acquiert un nouveau degré de vraisemblance, lorsqu'on l'applique au phénomène des quatre images produites par la superposition de deux rhomboïdes (1153), et aux variations que subissent ces images dans leur intensité, à mesure que s'opère la révolution du rhomboïde supérieur. Ces effets indiquent que le faisceau d'aberration, dans lequel tous les pans d'aberration étaient d'abord exactement tournés vers la région d'où émane la force qui agit sur eux, se soudivise peu à peu, à mesure que, pendant la rotation du rhomboïde, cette région change de position, ensorte que les molécules échappent, les unes après les autres, à la force attractive, pour subir la réfraction ordinaire. Le contraire arrive par rapport aux rayons de l'autre faisceau, qui avaient d'abord leurs pans d'aberration à angle droit sur la région d'où émane la force qui produit l'aberration; car ces pans se trouvant peu à peu dans une position plus favorable à l'égard de la force dont il s'agit, subissent son action les uns après les autres, et le faisceau finit par être tout entier dans le cas de l'aberration. On croit voir une affinité dont l'intensité augmente ou diminue, suivant que les corpuscules sur lesquels elle agit, sont plus ou moins en prise à son action, de manière que le nombre des corpuscules attirés s'accroît ou diminue lui-même par des quantités proportionnelles.

De la Vision à l'aide d'un seul Verre terminé par des Surfaces Curvilignes.

Nous commencerons par l'espèce de verre qui est d'une utilité plus générale; savoir, celle à laquelle on a donné le nom de *verre lenticulaire*, ou simplement celui de *lentille*, à cause de sa forme, qui représente deux segmens de sphère, appliqués l'un à l'autre par leurs faces planes.

Idée des Caustiques par Réfraction.

1175. Nous avons déjà vu (882) que parmi les rayons qui tombent sur la surface d'un verre lenticulaire, dans des directions parallèles à l'axe, ceux qui sont voisins de cet axe, après avoir subi deux réfractions, l'une en pénétrant le verre, l'autre en repassant dans l'air, concourent à peu près dans un point commun que l'on appelle *le foyer* des rayons parallèles.

Concevons maintenant qu'il y ait un point radieux r (*fig.* 173) situé à l'endroit de ce même foyer. Parmi les rayons que ce point envoie vers la lentille dans toutes les directions imaginables, ceux qui s'écartent peu de l'axe, tels que rg, ri, sortiront du côté opposé, parallélement au même axe, suivant des directions mp, uz. Mais les rayons plus éloignés de rx, tels que rb, rf, étant plus divergens que les rayons rg, ri, et par là moins disposés à s'infléchir de la quantité nécessaire pour qu'ils deviennent parallèles à l'axe, en repassant dans l'air, sortiront suivant des directions es, ln, qui divergeront soit entre elles, soit par rapport à l'axe, de manière cependant que cette divergence sera moindre que celle des rayons incidens.

Il suit de là que si l'on prolonge les rayons émergens zu, se, yq, leurs prolongemens iront se couper aux points v, a, c, etc., plus éloignés de la lentille que le point r, de manière que leurs intersections formeront une caustique, comme dans le cas de la réflexion sur la surface des miroirs concaves ou convexes. On donne aux courbes du genre de celle qui nous occupe ici, le nom de *caustiques par réfraction.*

Effets d'une Lentille, lorsque l'Objet est en deçà du Foyer des Rayons parallèles.

1176. Si l'on suppose que le point radieux soit situé entre le foyer des rayons parallèles et la lentille, alors les rayons qui tomberont sur le petit espace gi étant plus divergens que quand ils partaient de ce même foyer, il en résulte qu'à leur retour

dans l'air ils continueront de diverger, au lieu d'être parallèles, et en même temps la divergence de tous les autres augmentera.

1177. Au lieu d'un simple point radieux, concevons un objet AB (*fig.* 174) d'une certaine étendue, et placé de même en deçà du foyer des rayons parallèles. Soit O la position de l'œil. En nous bornant encore ici à considérer la marche des rayons qui partent des extrémités A, B de l'objet, nous pourrons toujours supposer deux cônes de lumière *cAe*, *fBh*, tellement situés qu'après s'être repliés d'abord en pénétrant dans la lentille, puis en rentrant dans l'air, ils aillent passer par la prunelle de l'œil O. Dans ce cas, les rayons tels que *Ac*, *Ae*, qui divergent sensiblement en partant du point A, n'auront plus, après leur émergence suivant les directions *ky*, *pu*, que le petit degré de divergence qui s'accorde avec la conformation de l'œil, ensorte que tous les cônes envoyés par les différens points de l'objet iront en peindre l'image sur la rétine.

Si l'on prolonge du côté opposé à l'œil les rayons *yk*, *up*, et tous les autres qu'il faut se représenter comme étant compris entre ceux-ci, on pourra appliquer à tous ces rayons ce que nous avons dit des rayons *yq*, *sc*, *zu* (*fig.* 173), c'est-à-dire, que les intersections de leurs prolongemens ne coincideront pas en un point commun. Mais comme ceux qui composent le cône parti du point A (*fig.* 174) sont très-rapprochés, les points de concours des prolongemens dont il s'agit seront resserrés dans un très-petit espace, ensorte qu'ici, comme dans d'autres cas analogues, dont nous avons déjà parlé (1037), les directions des différens rayons sont censées concourir vers un point unique, qui est comme leur centre d'action.

1178. Dans toutes les circonstances semblables à celle dont il s'agit ici, on voit l'objet droit et en même temps amplifié; car l'œil l'apperçoit sous l'angle *l*Oz sensiblement plus ouvert que AOB, sous lequel il le verrait à la vue simple.

1179. Dans les mêmes circonstances, la clarté de l'objet paraît augmentée. Car soit *r* (*fig.* 175, Pl. 12) un des points de l'objet, que nous supposerons être le point du milieu, et soit

hi le diamètre de la prunelle ; tous les rayons compris dans l'angle *prs* passeront par l'ouverture de la prunelle, suivant les directions *qh*, *li*, et les autres intermédiaires. Or, si l'on prolonge *rp* et *rs* vers l'œil, et qu'on supprime la lentille, les rayons renfermés dans l'angle *prs* se répandront sur tout l'espace *gk* qui est plus grand que le diamètre de la prunelle ; d'où il suit que la prunelle recevra plus de rayons par l'intermède de la lentille, que dans la vision simple ; et quoiqu'il y ait un certain nombre de rayons qui soient interceptés dans leur trajet à travers la lentille, cette perte étant plus que compensée par l'effet de la réfraction, il en résultera toujours un accroissement de lumière.

Enfin, le point de concours des rayons qui apportent à l'œil l'image de chaque point de l'objet, est plus éloigné que dans la vision ordinaire ; car le rayon réfracté *sl*, par exemple, en repassant dans l'air, s'écartera de la perpendiculaire au point *l* suivant une direction *li*, de manière que son prolongement *lz* passera à la droite du point *s* ; d'où il suit que les rayons *il*, *hq* concourront en un point *z* plus éloigné de l'œil que le point correspondant *r* de l'objet.

1180. A l'égard du jugement que nous portons des dimensions et de la distance de l'image, tout le monde sait qu'elle paraît effectivement plus grande que l'objet, et qu'en même temps on est porté à la juger plus près, quoique les rayons qui la dessinent au fond de l'œil soient dirigés comme s'ils partaient d'un objet fictif plus éloigné de l'œil que le véritable. Mais ce n'est ici qu'un jugement en quelque sorte précipité, dans lequel nous sommes d'abord entraînés par l'augmentation de grandeur, et auquel contribue encore l'augmentation de clarté. Prenez une longue aiguille, et faites-la passer doucement sous une lentille, dans une direction transversale et à une distance convenable du verre ; comparez attentivement la position de l'image avec celle de l'objet, et vous remarquerez que l'image est sensiblement plus éloignée, surtout si la lentille a une certaine étendue. Vous saisirez encore mieux la différence, en faisant aller et revenir l'aiguille parallèle-

ment à elle-même ; car il est des momens où l'on a encore besoin de se défendre de l'illusion qui tend à nous faire juger que ce qui nous paraît plus grand s'est rapproché de nous.

Cas où l'objet est au-delà du Foyer des Rayons parallèles.

1181. Revenons à la considération d'un simple point radieux r (*fig.* 173, Pl. 11), et supposons que ce point, en partant du foyer des rayons parallèles, s'écarte peu à peu de la lentille ; dans ce cas, les rayons qui tomberont sur le petit espace gi étant moins divergens que dans le cas où le foyer des rayons parallèles était leur point de départ, seront par là même déterminés à converger, soit entre eux, soit avec l'axe, derrière la lentille : en même temps la divergence des rayons es, qy plus éloignés de l'axe diminuera, et il y aura un terme où tous les rayons émergens se rejetteront vers l'axe, comme on le voit (*fig.* 176, Pl. 12). Dans ce dernier cas, parmi les rayons situés d'un même côté de l'axe, chacun sera coupé par le suivant, et l'on pourra concevoir une caustique qui passe par tous les points d'intersection.

1182. Substituons de nouveau à un simple point un objet AB (*fig.* 177) d'une certaine longueur, en le supposant toujours placé au-delà du foyer des rayons parallèles, et ne considérons, pour plus de simplicité, que ce qui a lieu par rapport au point R du milieu et aux deux points extrêmes A, B. Le point R est encore ici le sommet commun d'une infinité de cônes qui tombent à différens endroits de la surface de la lentille. Or, parmi tous ces cônes, celui dont l'axe Rt est perpendiculaire à la surface réfringente mtn, est composé de rayons qui concourent sensiblement en un point commun r derrière la lentille, ensorte qu'il se forme un foyer en cet endroit (1).

---

(1) Nous avons prouvé (*note* du n° 881) que la formule qui donne dans ce cas l'expression de la distance du foyer à la lentille est $z = \frac{mab}{(1-m)2b-ma}$,

De même il part de chaque extrémité, par exemple de A, une infinité de cônes plus ou moins obliques, dont les bases correspondent à différens endroits de la surface *mtn*. Or, parmi tous ces cônes, il y en a un dont les rayons concourent aussi à peu près en un même point derrière la lentille : c'est celui dont l'axe Ac est tellement situé qu'après s'être réfracté suivant *ch*, il rencontre la surface *mxn* à l'endroit où la tangente au point d'incidence *h* sur l'arc concave, est parallèle à la tangente au point d'incidence *c* sur l'axe convexe. Dans ce même cas, le rayon réfracté *ch* passe par le milieu de la lentille (1). On conçoit qu'il y aura toujours un cône envoyé par le point A, qui satisfera à ces conditions ; car si l'on suppose que la ligne *xt*, qui fait partie de l'axe du cône envoyé par le point R, restant fixe par son milieu, qui coïncide avec le centre de la lentille, tourne autour de ce centre, de manière que son extrémité *t* parcourre l'arc *tm*, et que son prolongement se réfracte continuellement dans l'espace situé entre *tm* et RA, ce prolongement aboutira successivement à

---

quantité dans laquelle *a* représente le rayon de la sphéricité que l'on suppose le même pour les deux surfaces, *b* la distance du point radieux à la lentille, et $\frac{1}{m}$ le rapport entre les sinus. Or, dans le cas d'une lentille de verre, $m = \frac{20}{31}$; donc $z = \frac{10ab}{11b - 10a}$.

(1) Soit *mn* (*fig.* 178) une lentille dont les deux arcs *mxn*, *mtn* que nous supposons de différentes courbures, pour plus grande généralité, aient leurs centres en *b* et en *l*. Sur l'axe *bl* prenons un point *o* tellement situé que *bo* soit à *ol* comme le demi-diamètre de l'arc *mxn* est à celui de l'arc *mtn*. Par ce même point menons une droite *ch* qui traverse la lentille dans une direction quelconque, et menons ensuite les deux demi-diamètres *bh*, *lc*. Dans les triangles *boh*, *loc*, on a *bo* : *ol* :: *bh* : *lc*. De plus, *col* = *hob*. Donc ces triangles sont semblables ; donc *ocl* = *ohb*. Donc si nous considérons la ligne *ch* comme rayon incident, relativement aux arcs *mxn*, *mtn*, ce rayon étant également incliné sur les lignes *lc*, *bh*, perpendiculaires aux surfaces réfringentes, les réfractions suivant les lignes *ca*, *ha'* seront égales, d'où il suit que ces lignes sont parallèles. Le point o, dont la position est évidemment invariable, d'après ce qui précède, se nomme *centre de la lentille*.

différens points placés entre R et A, et il finira par coincider avec le point A. Or il est évident qu'à ce terme la ligne *xt* aura la position *hc*; d'où il suit que si l'on considère maintenant Ac comme rayon incident, le rayon réfracté sera *ch*.

On voit aussi que le rayon Ac, en repassant dans l'air après sa réfraction en *h*, prendra une direction *ha* parallèle à celle qu'il avait d'abord; et si l'on suppose que la lentille n'ait qu'une petite épaisseur, on pourra considérer le rayon *ha* comme étant sensiblement sur la direction du rayon Ac, et ne formant avec lui qu'une même ligne.

Il suit de là que le cône auquel appartient l'axe Ac est, parmi tous ceux qu'envoie le point A, celui qui approche le plus de se trouver dans les mêmes circonstances que le cône du milieu, dont l'axe est la ligne R*t* : or, ce cône sera aussi celui dont les rayons concourront sensiblement derrière la lentille en un point commun *a*.

1183. On pourra appliquer le même raisonnement à tous les cônes partis des autres points de l'objet AB, d'où l'on voit que les rayons de tous ces différens cônes auront leurs foyers à peu près sur une ligne *bra* parallèle à la ligne ARB. Or, partout où il y a un foyer, il se forme une image du point radieux auquel appartient ce foyer; et de là vient que si l'on expose derrière la lentille un carton à la distance convenable, on verra l'image se peindre sur ce carton. On conçoit pourquoi, dans le même cas, l'image est renversée, puisque les seuls cônes dont les rayons soient ramassés, pour ainsi dire, de manière à produire des foyers, s'entrecoupent au milieu de la lentille. C'est sur ce principe qu'est fondée la construction de la chambre obscure dont nous donnerons, dans la suite, la description.

Il est aisé de juger que la lentille de l'expérience que nous venons de citer est à peu près, à l'égard du carton qui présente l'image de l'objet, ce qu'est le cristallin par rapport à la membrane qui tapisse le fond de l'œil, et qui reçoit pareillement les images des objets. Seulement cette lentille agit seule pour produire l'image que l'on voit sur le carton, au

lieu que les différentes humeurs de l'œil concourent avec le cristallin à la représentation des objets sur la rétine.

1184. Les choses étant dans le même état, au lieu de supposer à l'endroit de l'image *ab* un carton sur lequel l'œil aperçoive cette image, comme sur un tableau, à l'aide des rayons qui se réfléchissent de ses différens points, supprimons le carton, et concevons que l'œil aille se placer lui-même derrière la lentille, pour voir immédiatement l'image de l'objet AB (1). Il est d'abord évident qu'il ne pourra plus la voir par l'intermède des rayons *fb*, *ha*, etc., qui avaient servi à la lui rendre présente lorsqu'elle était peinte sur le carton, puisque les axes des cônes auxquels appartiennent ces rayons continuent de diverger, au lieu qu'il serait nécessaire qu'ils convergeassent vers cet œil.

Aussi la simple observation de l'espèce de changement de scène qui a lieu dans ce cas, suffit-elle pour indiquer que les rayons eux-mêmes ont changé de route ; car on voit alors communément deux images de l'objet ; de plus, chaque image n'est vue que d'un seul œil, et cela de manière que celle qui est située vers la gauche se peint dans l'œil droit et réciproquement ; c'est ce dont on peut s'assurer en fermant et en ouvrant chaque œil tour à tour. Enfin, quoique les rayons qui, dans ce cas, arrivent de chaque point de l'image à l'un ou à l'autre organe, continuent de se croiser entre la lentille et cet organe, ainsi que nous le verrons plus bas, nous ne rapportons plus alors cette image à sa vraie place, c'est-à-dire, aux endroits où se croisent les rayons, mais elle nous paraît être derrière la lentille, à peu près comme celle qui a lieu lorsque l'objet est situé en deçà du foyer des rayons parallèles, excepté que dans le cas présent, elle est renversée et plus petite que l'objet. Nous parlerons bientôt d'un cas particulier, dans lequel les deux images se réduisent à une seule, que l'on voit alors des deux yeux.

(1) L'œil doit être situé, dans ce cas, au-delà du foyer des rayons parallèles qui est de son côté.

1185. Il s'agit maintenant de prouver que parmi les divers cônes qui, des différens points d'un objet AB (*fig.* 179), se dirigent vers la lentille, il y en aura toujours qui seront repliés par la réfraction, de manière à produire les effets qui viennent d'être décrits. Supposons les deux yeux situés en *o* et *o'*. Du point B il part un faisceau *eBu*, dont les rayons extrêmes *Be*, *Bu* se réfractent dans la lentille suivant *es* et *uz*; et comme le rayon émergent qui sort par *s* est plus éloigné de l'axe que celui qui sort par *z*, il s'inclinera vers ce dernier; ensorte que les deux rayons, après s'être croisés en *b*, se dirigeront vers l'œil, et tendront à lui faire appercevoir dans ce même point, ou à peu près, l'image du point B. Par un raisonnement semblable, on prouvera que le faisceau *Ad* tend à produire le même effet sur l'œil *o*, par rapport à l'image qui se forme en *a* du point A, et ainsi de tous les points intermédiaires de l'image *ab*. Ce qui vient d'être dit de cette image s'applique, de soi-même, à l'image *a'b'* que l'œil *o'* apperçoit par l'intermède des faisceaux *Ag* et *Bf*, et l'on conçoit sans peine comment les deux images sont l'une et l'autre renversées et plus petites que l'objet.

La circonstance dont il s'agit ici est analogue à celle qui a lieu, lorsqu'à l'aide d'un miroir concave (1114) on apperçoit l'image double, soit derrière le miroir, soit par devant, parceque l'œil, qui est accoutumé à rapprocher et à identifier, pour ainsi dire, les deux images dans les cas ordinaires, où elles coincident presque exactement, les reçoit ici sous des positions tellement séparées, qu'il ne se prête plus à l'illusion qui les lui ferait juger réunies en une seule.

1186. Mais il peut arriver que les yeux, en variant leurs mouvemens, parviennent à une position sous laquelle les quatre faisceaux se croisent deux à deux aux endroits où leurs rayons ont eux-mêmes leurs intersections, auquel cas, les points *a*, *a'* d'une part, et les points *b*, *b'* de l'autre se confondront, ainsi que le représente la *fig.* 180, et alors il n'y aura plus qu'une seule image, qui sera vue des deux yeux à la fois.

Le premier phénomène, savoir celui qui produit les deux

images représentées *fig.* 179, a cela de singulier, que les lieux où l'on rapporte ces images ne sont pas situés entre la lentille et l'objet; et voici comment on peut expliquer jusqu'à un certain point cette singularité. On ne voit chacune des images dont il s'agit que d'un œil, comme nous l'avons dit, d'où il suit qu'il n'y a qu'un des axes optiques qui soit dirigé vers chaque image; et ainsi il manque une des conditions qui sont communément nécessaires pour nous aider à bien juger de la position des objets (1062), et qui le deviennent surtout lorsque la vision se fait par l'intermède d'un verre qui tire l'œil, en quelque sorte, de son état ordinaire. Ajoutons que, dans le cas présent, la position du véritable objet au-delà du verre, nous porte à juger que l'image est située du même côté.

1187. Si l'on présente un verre terne en deçà de la lentille, à l'endroit où se forment les foyers des cônes partis des différens points de l'objet, on appercevra les deux images sur ce verre même, comme s'il était nécessaire de donner un fond à cette peinture, tracée en quelque sorte au milieu de l'air, pour distraire l'œil de l'illusion où le jette la présence de la lentille; et ce qui prouve que, dans ce cas, ce sont les prolongemens mêmes des rayons reçus par ce tableau qui, en pénétrant le verre, vont copier au fond de l'œil les traits du dessin, et non pas de nouveaux rayons réfléchis par la surface postérieure du verre, c'est que s'il n'y a qu'une seule image, elle se montre ou disparaît suivant que l'on ferme l'un ou l'autre œil, comme cela aurait lieu sans l'interposition du verre terne. Voilà déjà un moyen de rapporter l'image à sa vraie place.

1188. Mais voici une expérience qui produit le même effet sans intermédiaire. Vous placez une lentille dans une position verticale, à une telle distance d'un objet très-sensible, par exemple, d'une boule de métal attachée au haut d'un fil de fer vertical, que vous puissiez voir deux images de cette boule à travers la lentille; vous écartez les yeux ensuite par degrés, et en même temps les deux images se rapprochent et deviennent toujours plus petites. Enfin, il y a un terme où elles concourent en une seule, et alors les deux axes optiques se

trouvant dirigés sur cette image unique, vous la voyez très-distinctement en deçà de la lentille. Ce cas est celui que présente la *fig.* 180.

Maintenant si, en continuant de fixer l'image, vous rapprochez peu à peu les yeux de la lentille, vous voyez toujours l'image simple, quoique vous repassiez par des points où auparavant vous l'aviez vue double, et de plus, elle vient elle-même comme au-devant de vous. Il nous est arrivé quelquefois, en pareille circonstance, d'amener cette image à la proximité de sept ou huit centimètres de l'œil, ce dont il était facile de juger en avançant le doigt de manière qu'il se trouvât à côté de l'image; et pour parvenir de nouveau à la voir double, nous étions obligés de recommencer l'expérience, après avoir regardé d'autres objets, comme pour effacer la dernière impression, et faire naître l'illusion dont elle avait pris la place.

Moyen de remédier au défaut de la Vue chez les Presbytes.

1189. Les yeux naturellement le mieux conformés subissent avec l'âge différentes altérations : leurs humeurs se dessèchent et diminuent de volume; la cornée et le cristallin s'aplatissent, la lumière y est moins infléchie par la réfraction : et, par une suite nécessaire, les sommets des pinceaux qui se forment dans l'œil ne tombent plus sur le fond de cet organe, mais tendent à aboutir au-delà. L'image alors, au lieu d'être composée de points distincts, n'est plus qu'un assemblage confus de petits cercles qui anticipent les uns sur les autres. On conçoit, d'après cela, pourquoi ceux dont la vue commence ainsi à baisser par l'effet de l'âge, et auxquels on a donné le nom de *Presbytes*, parviennent à lire encore assez distinctement, en plaçant le livre plus loin de leurs yeux; car de cette manière les cônes de lumière envoyés par les différens points de l'écriture ayant des axes plus longs, tandis que leur base reste égale au cercle de la prunelle, il en résulte qu'en général les rayons divergent moins en allant vers l'œil, que dans le cas où le livre

serait plus près, et cette divergence les rend plus propres à converger, en vertu de leur réfraction dans les humeurs de l'œil, ce qui peut rapprocher assez leur point de concours, pour le faire correspondre sur la rétine. Mais lorsque le vice de l'œil, venant à augmenter, prive le vieillard de cette dernière ressource, il y supplée au moyen de verres légérement convexes, appelés *lunettes*, dont l'effet est de diminuer la divergence des rayons qui, dans ce cas, arrivent à l'œil comme s'ils partaient d'un point plus éloigné; ensorte que quand les verres ont le degré de convexité assorti à l'état de l'œil, les rayons concourent au fond de cet organe.

Usage des Lentilles pour exciter la Combustion.

1190. Lorsque l'on présente une lentille aux rayons solaires, de manière que son axe coincide avec leur direction, ces rayons, après s'être réfractés deux fois, l'une en traversant le verre, l'autre en repassant dans l'air, vont se rassembler dans un certain espace situé sur l'axe, et que l'on appelle *le foyer* de la lentille. Les corps exposés à l'activité de ce foyer y subissent des altérations analogues à celles que produit le foyer du miroir concave (1122). La lentille, dans ce cas, prend le nom *de verre ardent*. Tschirnausen et Hartzoeker ont construit de ces lentilles qui avaient 13 décimètres (4 pieds) de diamètre.

Plus la lentille a d'étendue, et plus le foyer renferme de rayons. Mais ce foyer est proprement un assemblage d'une infinité de foyers, dont la dispersion sur différens points de l'axe fait perdre aux rayons une grande partie de leur activité. On les détermine à produire des effets beaucoup plus puissans, en les faisant passer par une seconde lentille plus petite et d'une forme très-convexe. Cette lentille réunit ainsi à l'avantage qui résulte d'une plus grande abondance de rayons, celui de les resserrer dans un espace plus étroit, où leur action s'exerce avec beaucoup plus d'énergie.

Effets des Verres Biconcaves.

1191. Lorsqu'on a bien saisi les effets des verres lenticulaires, il est facile de concevoir ceux des verres biconcaves, qui ont en général des propriétés contraires. Ainsi ces derniers verres font voir les objets plus petits qu'ils ne le sont réellement, parceque les deux côtés de l'angle visuel, qui mesure la grandeur apparente de l'objet, perdant une partie de leur convergence en traversant le verre, cet angle devient plus petit qu'il ne le serait à la vue simple.

1192. Les mêmes verres diminuent la clarté des objets, parceque chaque pinceau de lumière se dilate par l'effet de la réfraction ; d'où il suit qu'il arrive moins de rayons à la prunelle que si le pinceau eût conservé le degré de dilatation qu'il avait en partant de l'objet.

1193. Enfin, si l'on suppose que les rayons qui entrent dans l'œil soient prolongés du côté opposé, leur point de concours sera plus près de l'œil que dans le cas de la vision ordinaire. C'est encore une suite de la dilatation des pinceaux, qui rend les rayons plus divergens vers l'œil, ou, ce qui revient au même, plus convergens dans le sens opposé, que si le verre n'existait pas.

Il est vrai que quand nous regardons un objet au moyen d'un verre biconcave, notre premier mouvement est de le juger plus éloigné qu'à la vue simple, parceque nous le voyons plus petit; mais un coup d'œil plus attentif redresse bientôt ce faux jugement ; car si l'on fait ici une expérience semblable à celle que nous avons indiquée (1180), en parlant du verre lenticulaire, c'est-à-dire, si l'on fait aller et revenir, derrière le verre biconcave, un objet délié et d'une certaine longueur, et que l'on compare la distance apparente de la partie vue par réfraction, avec celle de l'autre partie qui dépasse le verre et que l'on voit à l'œil nu, il sera facile d'appercevoir que la première distance est plus petite que l'autre.

Moyen de remédier au défaut de la Vue chez les Myopes.

1194. On appelle *Myopes* ceux qui, par un défaut naturel, ont la cornée et le cristallin trop convexes. Cette figure, qui augmente la quantité de la réfraction, tend à rendre plus convergens les rayons des pinceaux qui se forment dans l'œil, ensorte que le point de concours des mêmes rayons est situé en deçà de la rétine. Aussi les myopes ne voient-ils distinctement que les objets voisins, qui envoient vers l'œil des rayons plus divergens, et par là moins disposés à converger, par l'effet de la réfraction dans le cristallin et les humeurs de l'œil. Cette imperfection étant opposée à celle qui affecte l'œil des presbytes, on y remédie par l'usage d'un verre légérement concave qui, augmentant la divergence des rayons que reçoit l'œil, alonge les pinceaux qui se forment dans cet organe, et détermine leurs sommets à tomber exactement sur la rétine.

1195. Les myopes semblent affectionner les petits objets: la plupart écrivent très-fin, et préfèrent de lire les ouvrages imprimés en petit caractère, parcequ'en adoptant des dimensions assorties à la portée étroite de leur vue, ils se ménagent la faculté d'embrasser un plus grand nombre d'objets d'un seul regard. Ils ont aussi l'habitude de fermer en partie les paupières (1), lorsqu'ils veulent voir distinctement des objets trop éloignés pour eux. On a cité deux avantages de ce mouvement naturel. D'une part, il détermine la paupière à se contracter et à donner accès à une plus petite quantité de lumière. Or, les myopes ne voient confusément les objets situés à une certaine distance, qu'en conséquence de ce que les cônes qui se forment dans leurs yeux ont, comme nous l'avons dit, leur sommet en deçà de la rétine, ensorte que les prolongemens des rayons dont ces cônes sont les assem-

(1) C'est ce qu'on appelle communément *cligner*.

blages

blages donnent naissance à de nouveaux cônes, dont la base rencontrant le fond de l'œil, y dessine un petit cercle, au lieu d'un simple point. Donc, lorsque le nombre des rayons qui s'introduisent dans l'œil est diminué, le petit cercle dont il s'agit est plus rétréci, et la vision en devient moins confuse. D'une autre part, les paupières, en se fermant, exercent sur l'organe une pression qui en diminue la convexité, et le ramène en partie vers la forme la plus favorable à la netteté de la vision.

Microscope simple.

1196. Lorsqu'on veut observer de très-petits objets, comme les étamines et les pistils des fleurs, les parties d'un insecte, on se sert communément d'une petite lentille dont la distance focale est fort courte, ou d'un globule de verre; c'est ce que l'on appelle *microscope simple*. Supposons d'abord que l'on emploie une lentille *mn* (*fig.* 181), il est facile de concevoir que si cette lentille est mince, et que l'œil soit appliqué en *o*, tout près de sa surface, l'angle *aob*, sous lequel cet œil verra l'objet *ab* que l'on suppose très-petit, sera à peu près le même qu'à la vue simple; car les rayons *ao*, *bo* passeront très-près du milieu *c* de la lentille, et parconséquent ils sortiront sensiblement parallèles aux directions qu'ils avaient en partant de l'objet, ensorte que leurs inclinaisons mutuelles ne seront presque point dérangées par l'effet de la lentille. Il suit de là que le microscope simple fait voir les objets à peu près sous la même grandeur apparente que s'ils étaient vus immédiatement à la meme proximité de l'œil. Or, voici ce que l'on gagne à se servir d'une lentille.

1197. Un petit objet placé très-près de l'œil nu, n'y produit qu'une image confuse, parceque les rayons qui composent les cônes de lumière envoyés par les différens points de cet objet, étant très-sensiblement divergens, ne peuvent se replier assez dans les humeurs de l'œil, pour que les sommets des cônes intérieurs aboutissent à la rétine. Les points de concours

tendent à se former plus loin, et l'on peut dire qu'à cet égard tous les hommes sont presbytes. On s'en convaincra facilement en regardant un petit objet très-voisin de l'œil ; l'image de cet objet paraîtra très-amplifiée, parceque l'œil étant, pour ainsi dire, en deçà des limites dans lesquelles est renfermé le champ de ses observations ordinaires, juge de la grandeur réelle par la grandeur apparente, comme lorsqu'il est au-delà des mêmes limites, c'est-à-dire, lorsque l'objet est très-éloigné de lui ; mais en même temps l'image prendra la forme d'une espèce de brouillard, par la raison que nous avons exposée.

Si, dans la même circonstance, on regarde l'objet à travers un papier percé d'un trou d'épingle, l'image paraîtra beaucoup plus nette, parceque ce trou ne laissera passer qu'une petite portion des rayons qui appartiennent à chaque cône, ensorte que les petits cercles que formeront sur le fond de l'œil les cônes intérieurs, étant presque réduits à de simples points, leurs impressions seront beaucoup plus distinctes.

1198. Maintenant voici ce que fait le microscope simple : il diminue sensiblement la divergence des rayons qui composent les cônes partis de l'objet, et les fait parvenir à l'œil sous le même degré d'inclinaison que s'ils venaient d'un objet situé à une distance ordinaire. En conséquence, la vision de cet objet deviendra distincte, et en même temps l'image prendra un nouveau degré de clarté, parceque, dans ce cas, la réfraction rassemble et condense les rayons, de manière qu'il en arrive davantage à la prunelle qu'elle n'en recevrait sans l'interposition du verre (1179) : de plus, l'angle visuel restant le même, l'objet sera vu sous la même grandeur apparente. Ainsi l'on sait qu'en général, un homme doué d'une bonne vue apperçoit distinctement un objet à la distance d'environ 22 centimètres (8 pouces) ; mais si l'objet est très-petit, l'angle sous lequel on le voit à cette distance rétrécit tellement l'image au fond de l'œil, que la vision n'a plus assez de netteté. Le microscope assimile l'image à celle d'un objet d'une grandeur très-sensible, qui serait placé à cette distance ordinaire de 22 centimètres, où la vision immédiate est distincte. Il laisse

à l'œil l'avantage de l'augmentation de grandeur, et fait disparaître l'inconvénient qui naît de la trop grande proximité de l'objet.

On dispose la lentille de manière que l'objet coincide sensiblement avec son foyer, parcequ'alors les rayons de chaque pinceau extérieur arrivent à l'œil ou parallèles, ou très-peu divergens, ce qui est la condition requise pour la netteté de la vision, en supposant l'œil bien conformé.

1199. Dans la même hypothèse, le diamètre apparent de l'objet, vu à travers la lentille, est à celui qui aurait lieu à la distance où l'œil apperçoit distinctement les objets ordinaires, comme l'angle sous lequel cet œil voit l'objet placé au foyer de la lentille, est à celui sous lequel il le verrait à la distance dont nous avons parlé. Or, les deux angles sous-tendent des cordes égales qui mesurent l'une et l'autre le diamètre réel de l'objet, de manière que chacun d'eux forme avec sa corde un triangle dont celle-ci est la base. Donc ces angles sont entre eux à peu près en raison inverse des hauteurs des triangles auxquels ils appartiennent. Or, la hauteur du triangle le plus court est la distance focale de la lentille, et la hauteur du plus long triangle est la distance relative à la vision distincte ; d'où il suit que le diamètre de l'objet paraît amplifié dans le rapport de cette dernière distance à la distance focale de la lentille. Par exemple, si nous supposons toujours que la distance relative à la vision distincte des objets d'une grandeur sensible soit de 22 centimètres, et que la distance focale de la lentille soit de $2^{millim.},5$, le diamètre de l'objet paraîtra augmenté dans le rapport de 88 à l'unité.

1200. On peut substituer à une lentille un globule de verre, que l'on forme aisément en faisant fondre un petit fragment de cette substance à la flamme d'une mèche à alkohol, pour éviter le mélange de matière fuligineuse qui troublerait la transparence du verre. On fait aussi des microscopes simples par un procédé très-facile, en perçant une plaque mince de métal d'un petit trou, et en faisant couler dans ce trou une goutte d'eau suspendue à une tête d'épingle, de manière que la goutte prenne

une forme bien arrondie ; mais ces sortes de gouttes produisent moins d'effet que les globules de verre, parceque leur puissance réfractive est plus petite.

De la Vision aidée par les Instrumens composés de plusieurs Verres.

Il nous reste à faire connaître les ressources que l'art a su tirer de la combinaison des verres, soit entre eux, soit avec les miroirs, pour créer ces instrumens qui sont devenus si féconds en découvertes entre les mains des astronomes, des naturalistes, et de toute cette classe d'observateurs qu'on a désignés sous le nom de *savans aux yeux de lynx*.

Les effets des télescopes et des microscopes dépendent en général de ce qu'un premier verre fait naître, dans l'espace compris entre lui et le suivant, une image que celui-ci transporte à son tour derrière un nouveau verre, et ainsi de suite, de manière que la dernière image devient comme l'objet immédiat de la vision; et toute la théorie relative à ce sujet consiste à déterminer la construction la plus avantageuse pour rendre cette dernière image aussi distincte, aussi grande et aussi éclairée qu'il est possible. L'œil qui reçoit cette image fait, en quelque sorte, partie du télescope ou du microscope, et l'ensemble de l'un et l'autre forme comme un seul instrument d'optique, ou, si l'on veut, un œil unique, qui réunit toute la puissance de la nature et de l'art pour élever la vision à son plus haut point de perfection.

Lunette Astronomique.

1201. Le plus simple de tous les télescopes est celui qui porte le nom de *télescope* ou de *lunette astronomique;* il est composé de deux verres convexes, dont l'un *gh* (*fig.* 182), qui est tourné vers l'objet, s'appelle *objectif*, et l'autre *kn*, situé vers l'œil o, est l'*oculaire*. Ce dernier a plus de convexité que l'autre, et son foyer *r* se confond avec celui de l'objectif *gh*,

ensorte que *cl* est égale à la somme des distances focales. L'œil placé au point *o*, où est situé l'autre foyer de l'oculaire, reçoit des rayons dont les impressions sur la rétine y représentent l'objet renversé et très-amplifié.

Il est aisé de juger, d'après la seule inspection de la figure, que l'objectif *gh* produit d'abord en *ab* une image de l'objet très-éloigné AB, semblable à celle dont nous avons exposé précédemment la formation (1182), et que l'on pourrait recevoir immédiatement, en plaçant un carton blanc à la distance *rc* du centre de l'objectif. Cette image se trouve substituée au véritable objet, et les pinceaux *kbm*, *nax*, etc., qui partent de ses différens points, et dont les rayons ne sont autre chose que les prolongemens de ceux qui ont passé à travers l'objectif, se replient dans l'oculaire, de manière qu'en repassant dans l'air, ils concourent vers l'œil suivant des directions *zo*, *po*, en même temps que les rayons de chaque pinceau perdent presque toute leur divergence, ce qui donne de la netteté à l'image au fond de l'œil. D'une autre part, l'angle *zop* sous lequel l'œil apperçoit l'objet fictif *ab* étant beaucoup plus grand que celui sous lequel il verrait le véritable objet, la grandeur apparente se trouve considérablement augmentée; et l'on prouve, par la géométrie, qu'elle est à la grandeur sous laquelle l'œil verrait immédiatement l'objet, comme la distance focale de l'objectif est à celle de l'oculaire (1).

(1) Soit AB (*fig.* 183) le diamètre d'un objet très-éloigné, tel que la lune; soient *m*, *r* les foyers des rayons parallèles, relativement à l'objectif *gh*, et *r*, *f*, ceux des mêmes rayons à l'égard de l'oculaire *kn*. On pourra toujours supposer, à cause de la grande distance à laquelle l'objet est situé, qu'un rayon parti d'une des extrémités, telle que A, de cet objet, après avoir passé par le foyer *m*, aille rencontrer la lentille *gh*; d'où il suit qu'il en sortira suivant une direction telle que *hn*, parallèle à l'axe R*r*, et qu'après avoir subi une nouvelle réfraction dans la lentille *kn*, il se dirigera vers le foyer *f*. Concevons maintenant un autre rayon A*c* qui passe par le centre de la lentille *gh*. Le rayon réfracté *ca* faisant un angle extrêmement petit avec l'axe *cl*, de manière qu'il lui est à peu près parallèle, sortira de la lentille *nk* sous une direction telle, que le point *o*, où il ira couper l'axe, coincidera presque avec le foyer *f* des rayons parallèles. Or, le rayon A*ca* peut être regardé comme l'axe du

Il suit de là que l'on gagne du côté des dimensions, à employer des oculaires d'un foyer plus court; mais en même temps on perd du côté de la netteté de l'image qui se peint au fond de l'œil, parceque les rayons d'un même pinceau, après avoir traversé un oculaire dont le foyer étant plus rapproché exige une plus grande convexité, ne concourent pas aussi exactement sur la rétine en un point commun.

Lunette de Galilée.

1202. La lunette que nous venons de décrire ne sert que pour les objets célestes, à l'égard desquels le renversement de l'image a peu d'inconvéniens. On a imaginé, pour les objets terrestres, une autre espèce de lunette, connue sous le nom de *Lunette Batavique* ou de *Lunette de Galilée*, qui est composée d'un objectif convexe et d'un oculaire concave, et qui fait voir les objets droits. Voici la marche de la lumière dans cette lunette.

---

pinceau qui forme en *a* une des extrémités de l'image située dans l'intervalle entre les deux lentilles; et puisque les points *o*, *f*, ainsi que les directions des deux rayons qui aboutissent à ces points, approchent beaucoup de se confondre, si l'on suppose l'œil situé en *o*, l'angle *nfl* sera sensiblement celui sous lequel cet œil voit, à travers le télescope, le demi-diamètre de l'image amplifiée. Mais parceque l'objet est extrêmement éloigné, l'intervalle entre les points *o*, *m* doit être considéré comme nul; ensorte que l'on peut supposer que l'angle *AmR*, ou son égal *cmh*, soit celui sous lequel l'œil verrait le demi-diamètre de l'objet à la vue simple. Donc la grandeur apparente, dans la vision à l'aide du télescope, sera à celle qui résulte de la vision naturelle, comme l'angle *nfl* est à l'angle *cmh*. Or, ces deux angles étant très-petits et appuyés sur des côtés égaux *ch* et *ln*, sont sensiblement entre eux comme *cm* ou *cr* est à *fl*.

Car si l'on fait coincider *cmh*, *lon* par leurs côtés *ch*, *ln*, ainsi que le représente la *fig* 184, les angles *cmh*, *coh*, que l'on suppose toujours très-petits, seront à peu près comme leurs sinus, ou comme les côtés *oh*, *hm*, qui dans le triangle *mho*, sont opposés à ces angles. Or, le rapport de *oh* à *hm* diffère très-peu à son tour de celui de *co* à *cm*, qui sont les deux distances focales. Voyez *Huyghens*, *Opera reliqua*; Amstelod., t. II, Dioptr., p. 134, et Smith, Traité d'Optique, p. 76.

Lorsqu'un objet est situé derrière un verre convexe, au-delà du foyer des rayons parallèles, l'image que forment, du côté opposé, les rayons partis des différens points de l'objet (1184), devient plus petite à mesure que cet objet est plus éloigné. Or, telle est la petitesse de celle que tend à produire l'objectif de la lunette batavique, que l'espace qu'elle occuperait, sur un carton placé à la distance convenable, serait sensiblement moindre que la surface sur laquelle les objets se peignent au fond de l'œil.

Soit *gh* (*fig.* 185) l'objectif; soient AC, BC deux rayons partis des extrémités de l'objet, lesquels après s'être croisés au centre C de l'objectif, auraient été former en *ab* une petite image de l'objet. Si l'on place un oculaire biconcave *kn* entre l'objectif et cette image, les rayons divergens C*s*, C*t* le deviendront encore davantage en passant à travers cet oculaire, et prendront les directions *s'b'*, *t'a'*; d'où il suit que si la ligne D*d* représente le diamètre de la prunelle de l'observateur, il verra l'image de l'objet sous la grandeur *b'a'* beaucoup plus considérable que celle sous laquelle il la verrait sans intermédiaire.

Supposons que C*s*, C*t* soient les axes des pinceaux envoyés par les points A, B; les rayons qui forment ces pinceaux convergeront vers l'oculaire, puisqu'ils iraient sans lui se réunir en *a* et en *b*; et telle est la courbure de ce verre, qu'il rendra les rayons émergens parallèles ou à peu près, ensorte qu'ils entreront dans l'œil sous les directions convenables pour produire une image nette au fond de cet organe.

Enfin, il est évident que l'objet paraîtra droit, parceque les rayons partis des points A et B, au lieu de se croiser, à l'ordinaire, en traversant la prunelle, se seront croisés en passant à travers l'objectif, ce qui produit le même effet par rapport à la situation de l'image.

Tel est donc l'effet de l'oculaire *kn* que, par son intermède, les rayons qui tendaient à faire naître dans l'espace l'image *ab*, la peignent au fond de l'œil sous de plus grandes dimensions, comme si cette image était celle d'un objet situé au-delà de *z*, et dont les extrémités envoyassent des rayons qui, après s'être

croisés dans ce même point, continuassent leur route, sans se croiser dans la prunelle elle-même, en suivant les directions zb', za'. La grandeur apparente de l'image est à celle sous laquelle l'œil verrait l'objet, à la vue simple, dans le rapport de la distance focale de l'objectif à celle de l'oculaire, comme cela a lieu pour la lunette astronomique (1).

1203. On nomme *champ* d'une lunette l'étendue de l'espace qu'elle permet à l'œil d'embrasser. Dans la lunette astronomique, la grandeur du champ dépend de la largeur de l'oculaire ; mais dans celle de Galilée elle est déterminée par la largeur de la prunelle, parceque les pinceaux de lumière $s'b'$, $t'a'$, qui sortent de l'oculaire, et qui renferment entre eux tous les autres envoyés par l'objet, vont, en s'écartant, passer près des bords de la prunelle, au lieu que dans la lunette astronomique, les pinceaux partent des bords de l'oculaire sous des directions convergentes, pour aller ensuite se croiser dans la prunelle : aussi la lunette de Galilée a-t-elle moins de champ, ce qui la rend d'un usage moins commode.

Lunettes à quatre Verres.

1204. On parvient à redresser les objets vus au moyen de la lunette astronomique, en ajoutant deux nouveaux verres tellement disposés que les foyers des verres voisins se confondent toujours en un point commun. Ces verres portent le nom d'*oculaires*, comme celui qui est à la proximité de l'œil. On jugera aisément des effets de cette lunette à la seule inspection de la *figure* 186. Les rayons eb, da, etc., qui forment l'image ab derrière l'objectif gh, après avoir pénétré le deuxième verre il, se croisent au foyer commun c de ce verre et du suivant ts ; ils passent à travers ce troisième verre, au-delà duquel ils vont former une seconde image $a'b'$, qui est renversée par rapport à la précédente, et enfin l'oculaire kn les reçoit, en les rendant convergens vers le centre O de la prunelle.

(1) Smith, Traité d'Optique, p. 79.

1205. A mesure que les objets vus à travers cette espèce de lunette sont plus éloignés, on est obligé de la raccourcir, pour conserver à la vision le même degré de netteté, c'est-à-dire, que l'on fait mouvoir un tuyau qui porte les oculaires *kn*, *ts*, *il*, de manière que le dernier se rapproche de l'objectif *gh*. Si au contraire les objets sont à une plus petite distance, on alonge la lunette, à l'aide d'un mouvement contraire, qui écarte l'oculaire *il* de l'objectif *gh*.

Pour concevoir la raison de ces mouvemens, supposons d'abord l'objet à la distance où la marche des rayons étant celle que représente la figure, tout soit disposé de la manière la plus favorable à la netteté de la vision. Imaginons ensuite que le spectateur aille se placer plus loin de l'objet. Les rayons partis du point R, que nous prenons pour exemple, formeront derrière l'objectif leur foyer en deçà du point *r* (884); il faudra donc, pour que la vision ne souffre pas de ce déplacement du foyer, que les oculaires s'avancent vers l'objectif, d'une quantité égale à celle dont le foyer *r* s'en est rapproché. Alors ce foyer se retrouvant dans la même position qu'auparavant, à l'égard des oculaires, les rayons qu'il leur envoie les traverseront et arriveront à l'œil dans le même ordre.

Si nous supposons au contraire que le spectateur se rapproche de l'objet, alors le foyer qui était en *r* se placera plus loin de l'objectif, et il faudra que les oculaires reculent à leur tour d'une égale quantité, pour que l'œil continue de voir nettement l'image de l'objet.

1206. Les personnes qui regardent pour la première fois des objets éloignés à travers une lunette, sont souvent surprises de ne pas les voir d'une grandeur démesurée, comme elles s'y attendaient. Car l'effet de la lunette, lorsqu'on s'en sert, par exemple, pour observer un homme placé à une grande distance, est de nous le faire juger beaucoup plus près, et de rendre tous ses traits beaucoup plus nets et mieux prononcés; et quant à la grandeur, il est vrai qu'elle est augmentée, si nous la comparons à celle sous laquelle nous

verrions cet homme dans l'éloignement où nous le supposons ; mais elle n'excède pas sensiblement celle que nous lui attribuerions, s'il était placé à une distance ordinaire.

Pour analyser cette action de la lunette, il faut d'abord remarquer que l'objet immédiat de la vision est ici l'image $a'b'$ qui se forme derrière l'oculaire, et qui est beaucoup plus petite que l'objet réel, et en même temps très-voisine de l'œil. Mais l'oculaire produit ici deux effets ; d'une part, les rayons de chacun des cônes envoyés par les extrémités a', b', que nous nous bornons encore ici à considérer, sortent de ce verre avec un léger degré de divergence, qui les met dans le même cas que s'ils partaient d'un objet beaucoup plus éloigné que l'image, mais beaucoup moins que l'objet réel. D'une autre part, ces cônes, après leur émergence, deviennent convergens, en formant un angle beaucoup plus grand que celui sous lequel l'œil verrait, à la vue simple, l'homme vers lequel est dirigée la lunette ; enfin telle est l'abondance des rayons qui composent ces mêmes cônes, que l'image qu'ils substituent à celle de l'objet réel se peint nettement sur la rétine.

Il résulte de ce qui vient d'être dit, que la lunette produit en nous une illusion qui tend à nous faire croire que c'est l'objet réel qui est venu tout à coup se mettre à la portée ordinaire de nos yeux. La diminution apparente de distance devient très-sensible pour nous, ainsi que l'augmentation de clarté, comme cela aurait lieu dans l'hypothèse d'un véritable rapprochement; et à l'égard de la grandeur jugée, quoiqu'elle se trouve aussi augmentée, par rapport à celle de l'objet vu dans le lointain, cet accroissement n'a rien d'extraordinaire, par la raison que l'homme qui est le sujet supposé de l'expérience, ne nous paraîtrait pas être un géant, s'il s'était avancé vers nous, par un mouvement subit.

Aberration de Sphéricité.

1207. Les instrumens que nous venons de décrire, et en général tous ceux qui sont connus sous le nom de *télescopes*

dioptriques, ont deux défauts frappans qui empêchent que les images ne soient nettes et bien terminées.

Le premier, que l'on nomme *aberration de sphéricité*, provient de la figure sphérique des verres, qui ne permet qu'aux rayons très-voisins de l'axe de concourir sensiblement en un point commun. Ceux qui sont plus éloignés, étant plus fortement réfractés, coupent l'axe en deçà du même point, ensorte que le foyer est réellement un espace d'une certaine étendue. Il en résulte que l'image principale, ou celle qui est produite à l'endroit où il se réunit le plus de rayons, est comme offusquée par une multitude d'autres images qui rendent la vision confuse.

1208. Le moyen le plus simple que l'on ait trouvé jusqu'ici pour remédier à cet inconvénient, est de diminuer la surface de l'objectif. L'étendue de cette surface est ce qu'on appelle l'*ouverture* du télescope, et elle se mesure par le nombre de degrés renfermés dans l'arc qui passe par deux points opposés du bord circulaire de la même surface, et par le point où l'axe de l'objectif la rencontre. En rétrécissant l'ouverture, on intercepte les rayons qui tombent à une certaine distance de l'axe, et qui troubleraient la vision.

Aberration de Réfrangibilité.

1209. On avait regardé d'abord le défaut dont nous venons de parler, comme le seul qui s'opposât à la perfection des télescopes ; mais celui qui provient de la différente réfrangibilité des rayons diversement colorés influe d'une manière bien plus nuisible sur la netteté des images.

Pour bien entendre ceci, remarquons que la surface d'un verre lenticulaire n'est autre chose qu'un assemblage d'une infinité de petits plans, dont deux quelconques pris de deux côtés opposés, sont censés appartenir à deux faces d'un prisme, pourvu qu'ils ne soient point dans les positions où les tangentes sont parallèles. Or, parmi les rayons d'un même faisceau, qui forment un foyer derrière une lentille, il n'y a que l'axe

qui sorte parallélement à lui-même. Tous les autres rayons sortent par des facettes inclinées à l'égard de celles par lesquelles ils sont entrés. Il en résulte qu'une lentille fait subir à la lumière une décomposition analogue à celle qui a lieu par l'intermède d'un prisme. Supposons, pour plus grande simplicité, qu'un faisceau de rayons parallèles rencontre une lentille sous des directions qui soient elles-mêmes parallèles à l'axe de cette lentille. Les rayons, après avoir repassé dans l'air, iront former le long de l'axe une série de foyers, parmi lesquels le plus voisin de la lentille sera celui des rayons violets, qui sont les plus réfrangibles, et le plus éloigné celui des rayons rouges, qui ont la plus petite réfrangibilité; les autres foyers seront situés entre les précédens, suivant l'ordre de leurs degrés de réfrangibilité. La même chose a lieu à l'égard d'un faisceau qui fait son incidence sous une direction quelconque.

1210. L'effet de la décomposition dont nous venons de parler exerce son influence sur la vision à l'aide des lunettes et des télescopes ordinaires. Les rayons diversement colorés, qui forment les pinceaux envoyés par les différens points de l'objet, étant dégagés les uns des autres au sortir de l'objectif, font naître derrière ce verre une image altérée par la diffusion des foyers; et les rayons qui sortent de l'oculaire transportent cette image au fond de l'œil, avec toutes ses causes d'imperfection. Les couleurs produites par la lumière décomposée s'effacent vers le milieu de l'image, où les rayons recomposent le blanc par leur mélange; mais elles deviennent sensibles en approchant des bords, et y font appercevoir ces franges irisées qui défigurent les images et les empêchent d'être nettement terminées : ce défaut a été nommé *aberration de réfrangibilité*.

Télescope Newtonien.

1211. Newton, dont les découvertes sur les couleurs ont servi à mettre en évidence le défaut dont nous venons de

parler, s'attacha à prouver combien il était nuisible au perfectionnement des télescopes dioptriques, surtout si l'on se proposait de raccourcir ces instrumens, pour les rendre plus maniables et d'un usage plus commode. En conséquence il prononça que la construction d'un télescope de ce genre, qui n'eût qu'une médiocre longueur et conservât aux images une netteté suffisante, était *une affaire désespérée* (1).

Dans cette persuasion, il tourna ses vues du côté de la réflexion, et imagina une construction dans laquelle il substituait à l'objectif un miroir concave de métal. L'instrument qu'il exécuta d'après ce principe, est connu sous le nom de *Télescope Newtonien*, et nous allons en donner une idée.

1212. Soit AB (*fig.* 187) l'image d'un objet lointain, produite à l'aide du miroir concave MVN, de manière que SMA, TGA représentent les rayons extrêmes du pinceau envoyé par le point de l'objet auquel répond le point A de l'image. Si l'on voulait faire passer immédiatement cette image à travers un oculaire, on en intercepterait une partie : or, on pare à cet inconvénient, en détournant cette image au moyen d'un petit miroir plan *de*, incliné de 45^d. à l'axe HV du miroir concave, d'où résulte une seconde image *ab*, qui devient l'objet de la vision. Les rayons *ar*, *az* passent à travers l'oculaire *kn*, qui, comme on le voit, est situé de côté, et, après s'être réfractés en repassant dans l'air, suivant des directions *uy*, *qh*, à peu près parallèles, se dirigent vers l'œil placé en O, et lui font voir l'image amplifiée sous l'angle qOx. Cette image est renversée, en vertu des propriétés du miroir concave que nous avons exposées plus haut (1117). Ces sortes d'instrumens ont été nommés, en général, *Télescopes catadioptriques*, parcequ'ils réunissent les effets combinés de la réflexion et de la réfraction.

1213. Newton avait été prévenu quelques années auparavant, relativement à l'idée d'un télescope construit suivant cette méthode, par Jacques Gregori, qui donna dans son *Optica promota*, la description de celui qu'il avait imaginé. Il employait

(1) *Newtonis Optice*, lib. I, pars 1, propos. 7.

deux miroirs curvilignes, l'un parabolique, l'autre elliptique; mais la difficulté d'exécuter de pareils miroirs, y a fait substituer depuis des miroirs simplement sphériques : le plus grand est placé au fond du télescope, comme dans la construction de Newton; l'autre, qui est très-petit, regarde le premier par sa concavité. L'image formée par la réflexion sur le grand miroir, est reçue par le petit, qui la réfléchit à son tour. On place deux oculaires derrière le grand miroir qui est percé dans son milieu d'une ouverture circulaire, par laquelle passe l'image renvoyée par le petit miroir. Le premier oculaire produit une nouvelle image, d'où partent les rayons qui vont se rendre à l'œil en sortant du second oculaire sous des directions parallèles.

Ce télescope fait voir les objets droits, et par là même est plus propre que celui de Newton à l'observation des objets terrestres; mais il le cède à ce dernier, soit du côté de la clarté, parceque la lumière a un verre de plus à traverser, soit pour la perfection de l'image, parceque le second miroir, qui est concave comme le premier, ajoute encore aux petites altérations inséparables de la réflexion qui se fait sur ces sortes de miroirs. Après tout, la construction des télescopes catadioptriques exigeait une multitude de précautions délicates, et il fallait long-temps tâtonner, pour les diriger vers les objets que l'on voulait observer.

Découverte des Lunettes Achromatiques.

1214. Tel était l'état de la dioptrique, lorsqu'en 1747, Euler, en réfléchissant sur la structure de l'œil, conçut une idée qui a eu les suites les plus avantageuses pour le progrès de cette science. Voici en quoi consiste l'idée dont il s'agit. Lorsque nous regardons les objets à la vue simple, leurs images ne sont altérées par aucun mélange de couleurs étrangères. Cet inconvénient n'a lieu que quand des images produites par la réfraction à travers une lentille, et déjà teintes de couleurs prismatiques, deviennent les objets immédiats de la vision.

Euler concluait de là que l'œil ayait toutes les propriétés d'un instrument capable de faire disparaître l'aberration de réfrangibilité ; il ne douta point que les différentes humeurs de cet organe ne fussent arrangées de manière qu'il n'en résultât aucune diffusion des foyers, et il jugea qu'en le prenant pour modèle, et en combinant, d'une certaine manière, des milieux de densités différentes, on parviendrait à construire des télescopes, à l'aide desquels les images auraient la même perfection que celles qui ont lieu lorsque nous n'employons, pour voir les objets, d'autre instrument que l'œil lui-même.

1215. Euler, en partant de l'idée que nous venons d'exposer, chercha les dimensions que devaient avoir des objectifs composés de verre et d'eau, pour imiter la combinaison qui a lieu naturellement par rapport à l'œil ; mais Dollond, savant opticien anglais, rejeta ces dimensions, parcequ'elles étaient fondées sur une loi de réfraction dont il soupçonnait la vérité (1) : il essaya d'employer une loi différente, qui ne lui réussit pas. La discussion s'engagea de part et d'autre. Euler insistait toujours sur la possibilité d'anéantir la diffusion du foyer par le procédé qu'il avait indiqué. Dollond, de son côté, avait fini par regarder la chose comme absolument impraticable, et il repoussait, avec le nom et l'autorité de Newton, toutes les raisons qu'on lui opposait.

1216. Ce qui rendait ce célèbre artiste si ferme dans son opinion, c'était le résultat d'une expérience de Newton, que nous avons déjà indiquée (1135), et qu'on était bien éloigné de croire qu'il eût manquée, lui qui avait coutume d'interroger si adroitement la nature.

Newton ayant fait passer un faisceau de lumière à travers deux milieux contigus, de densités différentes, savoir, l'eau et le verre, crut remarquer que quand les deux surfaces, dont l'une recevait les rayons incidens et l'autre donnait issue aux rayons émergens, se trouvaient tellement disposées, que la lumière fût redressée par des réfractions contraires, ensorte

(1) Smith, Traité d'Optique, p. 384, note 661.

que les rayons émergens devenaient parallèles aux incidens, elle sortait toujours blanche. Au contraire, si les rayons émergens étaient inclinés aux incidens, la blancheur de la lumière se colorait vers ses extrémités, à mesure qu'elle s'éloignait du point d'émergence (1).

1217. Voici maintenant la conséquence à laquelle conduisait ce résultat, que Newton étendait, par analogie, à toutes les espèces de milieux. Les objectifs que l'on emploie dans la construction des télescopes ne produisent les images qui deviennent les objets de la vision (1200) pour un œil placé derrière l'oculaire, qu'autant que la réfraction à travers ces objectifs écarte les rayons émergens, relatifs à chaque pinceau de lumière, du parallélisme avec les rayons incidens. Donc, puisque l'on ne peut empêcher que, dans le cas où ce parallélisme cesse d'avoir lieu, les couleurs renfermées dans la lumière ne se séparent, même lorque l'on essaye de combiner des substances différemment réfringentes, il est impossible de concilier la destruction des franges irisées qui bordent les images, avec l'effet de la réfraction pour produire ces mêmes images. Cette conséquence s'éclaircira encore d'après les nouveaux détails dans lesquels nous entrerons bientôt.

La persuasion où l'on était que Newton avait fait son expérience avec l'exactitude qui lui était ordinaire, les recherches de Clairault qui, ayant examiné la loi proposée par Euler, avait trouvé qu'elle ne soutenait pas l'épreuve du calcul, tout conspirait à faire croire que Newton avait posé la borne qu'il était défendu à la science et à l'art de franchir.

1218. Cependant en 1755, Klingenstiern, professeur de mathématiques à Upsal, fit passer à Dollond un écrit, dans lequel il se bornait à attaquer l'expérience de Newton par la métaphysique et par la géométrie, mais d'une manière assez imposante pour forcer Dollond de douter de la vérité de cette expérience. Enfin il osa la répéter, et la trouva fausse. Il joignit deux plaques de verre par deux de leurs bords,

(1) *Optice Lucis*, lib. I, pars 2, experim. 8.

ensorte

ensorte qu'il pouvait faire varier à volonté l'angle qu'elles formaient entre elles, puis il remplit d'eau l'espace intermédiaire; il plongea dans cette eau un prisme de verre, dont l'angle était tourné en haut, c'est-à-dire en sens contraire de l'angle formé par les deux plaques de verre. Il inclina ensuite ces plaques sous différens degrés, jusqu'à ce que les objets vus au travers de ce double prisme parussent sensiblement à la même hauteur que dans la vision simple. Il était bien sûr alors que les réfractions se détruisaient l'une l'autre, c'est-à-dire, que les rayons émergens étaient parallèles aux rayons incidens. Or, les images, dans ce même cas, étaient teintes des couleurs de l'iris. Venait-on ensuite à faire mouvoir de nouveau les plaques de verre, jusqu'à un certain degré d'inclinaison? les iris disparaissaient; mais les objets n'étaient plus à la même hauteur que quand on les regardait immédiatement, et ainsi l'aberration de réfrangibilité était anéantie, sans que les réfractions se corrigeassent mutuellement (1).

Cette expérience décida la question. On chercha des substances dont la combinaison fût propre à détruire la diffusion des foyers, en laissant subsister la plus grande quantité possible de réfraction. Des géomètres illustres s'occupèrent de déterminer les courbures les plus avantageuses relativement aux objectifs composés de différens milieux; et c'est de toutes ces recherches qu'est sortie la construction des lunettes *achromatiques*, c'est-à-dire, de celles qui font voir les images nettement terminées et sans aucunes franges de couleurs empruntées. Nous allons exposer, le plus clairement que nous pourrons, à l'aide du simple raisonnement, les principes sur lesquels est fondée cette construction.

Théorie des Lunettes Achromatiques.

1219. Nous avons vu (949) que Newton avait déterminé immédiatement les différences entre les sinus de réfraction des rayons diversement colorés qui composent la lumière,

(1) Smith, Traité d'Optique, p. 383, notes 658 et suiv.

pour le cas où le passage se fait du verre dans l'air, et qu'il avait trouvé que la loi de ces différences était la même que celle qui représente les sept notes de notre échelle musicale, relative au mode mineur. Supposons que l'on emploie un prisme d'une autre matière que le verre, et qui soit, par exemple, beaucoup plus dense. Si les circonstances sont les mêmes, c'est-à-dire, si les deux angles réfringens sont égaux, et les rayons incidens également inclinés aux surfaces réfringentes, ces rayons s'infléchiront en général sous de plus grands angles dans le second prisme; d'où il suit que la qnantité dont le faisceau sera dilaté, au sortir de ce prisme, sera plus considérable. Supposons de plus, que les réfractions partielles suivent entre elles une même loi relativement à toutes les espèces de substances, c'est-à-dire, cette loi qui est représentée par notre échelle musicale. Si l'on prend pour terme de comparaison la réfraction du rayon qui occupe le milieu du spectre solaire, et que l'on peut regarder comme l'axe du faisceau dilaté, il est clair que la quantité totale de la dilatation suivra, pour les différentes substances, le même rapport que la réfraction du rayon dont il s'agit; ensorte que si cette dernière est, par exemple, d'un tiers plus forte dans le second prisme, le faisceau qui en sort se trouvera dilaté sous un angle plus ouvert à proportion. La réfraction de ce rayon, qui occupe le milieu du spectre, est ce qu'on appelle la *réfraction moyenne*, et la quantité de la dilatation, ou l'excès de la réfraction du rayon violet sur celle du rayon rouge, se nomme *dispersion*.

Dans la même hypothèse, où la réfraction moyenne serait proportionnelle à la dispersion, on ne pourrait jamais détruire l'effet de la dispersion en combinant plusieurs milieux, sans que l'effet de la réfraction moyenne ne fût en même temps anéanti; car la compensation qui aurait lieu à l'égard de l'axe du faisceau s'étendrait également à tous les autres rayons, qui sortiraient de même parallèles à leurs premières directions. C'était la conséquence à laquelle conduisait l'expérience de Newton, et que lui-même en avait déduite.

Mais il n'en est pas ainsi, et la loi que suivent les réfractions des rayons diversement colorés varie suivant les différentes natures des milieux, ou, ce qui revient au même, la dispersion n'est pas proportionnelle, dans les différens milieux, à la réfraction moyenne; ensorte qu'il peut très-bien arriver, par exemple, qu'un milieu qui aurait une réfraction moyenne, seulement un peu plus forte que celle d'un autre milieu, fasse subir aux rayons de la lumière une dispersion plus considérable.

1220. Cela posé, concevons d'abord deux prismes égaux et semblables de la même matière, appliqués l'un contre l'autre, de manière que leurs angles réfringens se trouvent tournés en sens contraire. Soient *acb*, *cby* (*fig.* 188) les coupes des deux prismes dans un sens perpendiculaire aux axes; *c* et *b* seront les angles réfringens. Or, dans ce cas, il est évident qu'un faisceau de lumière *de* qui rencontre la surface *ca* sous une obliquité quelconque, après s'être dilaté en traversant les deux prismes, sortira de manière que les différens rayons émergens *ks*, *rq*, *tu* seront parallèles au rayon incident *de*, puisque *by* est elle-même parallèle à *ca*.

Imaginons maintenant que le prisme *cby*, étant d'une nature différente de celle du prisme *acb*, ait une réfraction moyenne seulement un peu plus forte, et qu'en même temps la dispersion qu'il fait subir aux rayons soit beaucoup plus considérable à proportion : l'axe *rq* du faisceau émergent ne sera plus dirigé par la réfraction moyenne parallélement à *de*; et parconséquent l'image du point *d* sera un peu déplacée. De plus, les rayons extrêmes *ks*, *tu* divergeront d'une quantité beaucoup plus grande que celle qui mesure le déplacement de l'image du point *d*. Si l'on fait varier alors l'angle *cby* jusqu'au point où cette image serait remise à sa place, et où parconséquent l'effet de la réfraction moyenne serait détruit, il est clair que la dispersion sera encore très-sensible. Enfin, si l'on continue de faire varier le même angle jusqu'à ce que l'effet de la dispersion soit nul à son tour, la réfraction moyenne reparaîtra, et l'image du point *d* sera déplacée de nouveau; c'est-à-dire, que d'une part la lumière sera recomposée, et que d'une

autre part les rayons émergens s'écarteront du parallélisme avec les incidens.

1221. Supposons que *al* (*fig.* 189) représente un filet de lumière parti d'un point visible, situé à une très-grande distance sur l'axe AR de la lentille *mn*; ensorte qu'il puisse être censé parallèle à cet axe (1). Imaginons de plus, que ce filet ne soit composé que de deux rayons, l'un rouge et l'autre violet; ils se réfracteront tous les deux dans la lentille, en se rapprochant de la perpendiculaire *pls* au point d'immersion. Mais la direction *lk* du rayon violet, dont la réfrangibilité est plus considérable, fera un plus petit angle avec la perpendiculaire que la direction *lg* du rayon rouge, d'où il suit que le premier sera plus incliné vers l'axe que le second.

Maintenant, si les deux perpendiculaires *qi*, *be*, relatives à l'incidence des rayons sur la surface *mkn*, étaient parallèles, l'angle d'incidence *lkb* du rayon violet étant plus grand que l'angle d'incidence *lgq* du rayon rouge, cette seule circonstance, à réfrangibilité égale, déterminerait le rayon violet à repasser dans l'air sous une direction qui divergerait par rapport à celle du rayon rouge, et ainsi le premier irait rencontrer l'axe à une distance de la lentille plus petite que celle du second. Or, quoique la direction de la perpendiculaire *be*, qui se rejette un peu par son extrémité supérieure vers la perpendiculaire *qi*, tende à diminuer l'angle d'incidence *lkb*, et, par une suite nécessaire, l'angle de réfraction *ekf*, comme le rayon violet est plus réfrangible que le rayon rouge, et que d'ailleurs il part d'un point *k* plus voisin de l'axe que le point *g* qui appartient au rayon rouge, il en résulte toujours que son point d'intersection *f* avec l'axe est plus voisin de la lentille que le point *f'* où se fait la rencontre du rayon rouge avec le même axe (2).

---

(1) Il faut concevoir en même temps ce filet comme très-voisin de l'axe, dont on ne l'a séparé ici d'un intervalle sensible, que pour la netteté de la figure.

(2) La formule qui donne la distance z entre le foyer et la lentille est, en général, $z = \frac{mn}{2(1-m)}$, comme nous l'avons vu (882), m étant le sinus de

Si l'on suppose d'autres rayons de chaque espèce, qui, en allant du point radieux vers la lentille, passent de même très-près de l'axe, tous les rayons violets émergens formeront un foyer en f, et les rayons rouges en formeront un autre en f'. Tel sera l'effet de la dispersion, à l'égard de la lentille mn.

1222. Mais concevons derrière cette lentille un second verre $mnxx$ (*fig.* 190), qui soit biconcave, et qui ait une réfraction moyenne seulement un peu plus sensible que celle de la lentille, et une dispersion beaucoup plus considérable à proportion. Le rayon rouge lg se réfractera de nouveau, dans le verre biconcave, suivant une direction telle que gt, et comme la grande dispersion de ce verre rend la réfraction du rayon violet beaucoup plus forte, par rapport à celle du rayon rouge, qu'elle ne l'était dans la lentille, le rayon violet, en entrant dans le verre biconcave, se rapprochera tellement de la perpendiculaire bpe, que sa nouvelle direction pd ira croiser en un point u la direction gt du rayon rouge. Il en résulte que l'angle d'incidence pdr du rayon violet, à la rencontre de la surface zx, sera plus petit que l'angle d'incidence gto du rayon rouge. Mais le rayon violet, par une suite de la supériorité de sa réfraction, repassera dans l'air, sous une direction df telle-

---

réfraction, lorsque le sinus d'incidence est l'unité. Concevons que cette formule se rapporte à la réfraction du rayon rouge, et que celle qui est relative à la réfraction du rayon violet soit $z' = \frac{m'a}{2(1-m')}$. Dans cette hypothèse, m et m' étant les sinus de réfraction au passage de l'air dans le verre, il est évident que m' sera plus petite que m, puisqu'alors le rayon violet, à incidence égale, se rapproche plus de la perpendiculaire au point d'immersion, que le rayon rouge. Donc le numérateur $m'a$ sera plus petit que le numérateur ma; d'une autre part, le dénominateur $2(1-m')$ sera plus grand que le dénominateur $2(1-m)$, puisque ici la quantité m ou m' est soustraite. Il suit de là que la fraction $\frac{m'a}{2(1-m')}$ sera plus petite que la fraction $\frac{ma}{2(1-m)}$, c'est-à-dire, que le foyer z' des rayons violets sera plus rapproché de la lentille que le foyer z des rayons rouges.

ment située, que l'angle qu'elle formera avec la perpendiculaire *rh* regagnera sur l'angle de la direction *tf* du rayon ronge avec la perpendiculaire *oy*, ce qui sera nécessaire pour que les deux directions aillent concourir en un point commun *f*. Tous les rayons de chacune des deux espèces, qui partiront du même point visible, sous des directions très-voisines de l'axe, se croiseront aussi au foyer *f*, où ils produiront une image unique du point dont il s'agit, et de là ils continueront leur route, en se dirigeant vers l'oculaire.

1223. Ainsi, il y a cette différence entre l'effet des deux verres dont il s'agit ici, pour corriger l'aberration de réfrangibilité, et celui de deux prismes appliqués l'un à l'autre par une de leurs faces (1220), que les figures curvilignes des verres déterminent les rayons émergens à se confondre en un même point, au lieu que ces rayons, en sortant des prismes, sont parallèles entre eux, comme ils l'étaient avant d'y entrer, et cela par une suite des surfaces planes que leur présentent les deux milieux qu'ils ont à traverser.

Si le pouvoir dispersif du verre biconcave variait dans le même rapport qne sa réfraction moyenne, le rayon rouge et le rayon violet ne pouvant se croiser dans ce même verre, ne concourraient jamais en un foyer commun, après leur émergence. Dans le cas où tous les rayons de chaque espèce qui seraient partis d'un même point de l'objet, prendraient, en repassant dans l'air, des directions inclinées à celles des rayons incidens, pour se rejeter vers l'axe, ils formeraient deux foyers distincts, comme lorsqu'ils traversent un seul verre *mn* (*fig.* 189); c'est-à-dire, que la réfraction moyenne nécessaire à la production des images subsistant encore, la dispersion ne serait pas détruite : et, si telle était la courbure des verres, que l'effet de la dispersion eût disparu, cela ne pourrait avoir lieu sans que les rayons émergens de l'une et l'autre espèce ne fussent parallèles aux rayons incidens; et parceque ceux-ci composent un seul cône par leur assemblage, ce cône serait censé se prolonger au-delà du verre biconcave, abstraction faite de la petite déviation produite par l'épaisseur des verres.

Alors il n'y aurait plus de foyers, ni parconséquent d'images, et l'on ne gagnerait rien à placer un pareil assortiment de verres entre l'œil et l'objet.

1224. On voit, par ce qui précède, qu'à la rigueur le foyer *f* (*fig.* 190) n'est que le point de réunion des rayons extrêmes, savoir, les rouges et les violets, auxquels il faut ajouter les rayons moyens, qui sont les verts, et qui forment comme l'axe du cône dont le sommet est à l'endroit du même foyer. Mais les petites aberrations qui existent encore dans les rayons intermédiaires sont en quelque sorte couvertes par la parfaite coincidence des extrêmes.

1225. Les deux substances dont on compose l'objectif des lunettes achromatiques sont, l'une le *flint-glass*, qui est une espèce de verre dans lequel il entre environ un tiers de *minium*, ou d'oxide rouge de plomb, et l'autre le *crown-glass*, qui est de la nature du verre ordinaire employé par les vitriers. On a trouvé que la dispersion produite par le flint-glass était très-grande à l'égard de celle qui provenait du crown-glass, à peu près dans le rapport de 3 à 2, tandis que sa réfraction moyenne surpassait peu celle du même verre (1). Dans un grand nombre de lunettes achromatiques, l'objectif est formé simplement de deux verres, l'un biconcave, ou convexe d'un côté et concave de l'autre, qui est de flint-glass, l'autre biconvexe, qui est de crown-glass, et dont une des convexités s'emboîte dans la concavité du premier. D'autres lunettes ont leur objectif composé d'un verre biconcave de flint-glass placé entre deux verres biconvexes de crown-glass. Ces lunettes sont plus parfaites que les précédentes.

1226. La construction que nous venons de décrire ne corrige l'aberration de réfrangibilité que par rapport à l'objectif, elle laisse subsister celle qui provient de l'oculaire ; mais comme le court trajet que les rayons qui sortent de ce verre

(1) Suivant les expériences de Clairaut, le rapport de réfraction pour le rayon moyen est, dans le flint-glass, celui de 1,6 à 1, et dans le verre commun, celui de 1,55 à 1. Smith, Traité d'Optique, p. 447.

ont à faire pour arriver à l'œil ne leur permet que de subir une assez légère séparation, on regarde l'aberration qui en résulte comme susceptible d'être négligée ; l'objectif fait l'essentiel ; le reste est de nature à pouvoir être toléré par l'œil.

Microscope à deux Verres.

1227. Nous venons de parler des instrumens qui font franchir à l'œil des distances immenses ; nous devons faire connaître aussi ceux qui donnent pour lui de la grandeur aux atomes. Le microscope à deux verres a beaucoup d'analogie avec le télescope astronomique (1201). L'objectif *gh* (*fig.* 191) est très-petit et très-convexe ; on place l'objet *ab* un peu plus loin que le foyer de ce verre, d'où il suit que les rayons de chacun des faisceaux, qui vont de *a* en *a'* et de *b* en *b'*, lesquels rayons sortiraient parallèles si l'objet était exactement au foyer, ne s'inclinent que peu l'un vers l'autre ; ensorte qu'ils forment une image renversée *a' b'* de l'objet, à une grande distance de l'objectif, et qui parconséquent a déjà beaucoup plus d'étendue que cet objet. L'oculaire *kn* est situé de manière que son foyer concourt à peu près avec le milieu *x* de l'image *a' b'*, et ainsi les rayons *lo*, *sy* d'une part, et *ty*, *ro* de l'autre, étant très-peu divergens, et, de plus, les deux pinceaux auxquels appartiennent ces rayons acquérant, au contraire, une convergence considérable, l'œil placé en *o* verra l'objet en *a'' b''* très-amplifié, pour deux raisons différentes.

Car l'image *a' b'*, si l'œil pouvait en recevoir immédiatement l'impression, paraîtrait déjà sensiblement plus grande que l'objet *ab*. Or cette image, à son tour, devient l'objet que l'œil aperçoit à travers l'oculaire, et ce verre faisant ici l'office d'une forte lentille, l'angle *rol* sous lequel l'œil verra distinctement ce même objet en *a'' b''*, sera beaucoup plus grand que celui sous lequel il le verrait avec la même netteté sans aucun intermédiaire. Donc le grossissement de l'image étant une combinaison de deux effets, dont chacun tend par lui-même à augmenter

très-sensiblement ses dimensions, croîtra dans un très-grand rapport. On fait aussi des microscopes à trois verres, auxquels il est facile d'appliquer l'explication précédente.

1228. Ces admirables instrumens ont, pour ainsi dire, doublé l'univers à notre égard : ils nous ont fait voir, dans des gouttes presque imperceptibles de différens liquides, des animaux jusqu'alors inconnus ; il nous ont dévoilé plusieurs mystères de l'organisation des plantes. Des corpuscules, en apparence informes, prennent des figures régulières ; les poussières qui composent la graine de la mauve deviennent des globules hérissés de pointes ; celles qui sont portées des étamines sur les pistils des diverses plantes, paraissent de même sous des formes symétriques et constantes dans chaque espèce ; les plus petites parties des insectes offrent des assemblages de pièces assorties entre elles avec un art dont le nôtre n'est qu'une imitation grossière ; et ce que l'œil revoit est aussi nouveau pour lui que ce qu'il n'a pas encore vu.

Description de quelques Instrumens particuliers de Dioptrique.

Les instrumens que nous nous proposons de décrire dans cet article, ont pour but de représenter des images qui sont vues immédiatement sur des surfaces planes disposées pour les recevoir.

Chambre Obscure.

1229. Si l'on pratique au volet d'une chambre exactement fermée, une ouverture d'environ 27 millimètres (un pouce) de diamètre, la lumière qui s'introduit par ce trou va dessiner sur la muraille opposée les images des objets extérieurs, dont les traits sont seulement comme ébauchés, et ressemblent à des ombres légères. Cette observation a fait naître l'idée de l'instrument d'optique appelé *chambre obscure* ou *chambre*

noire. Au lieu de laisser libre l'ouverture par laquelle entre la lumière, on y applique un verre lenticulaire, qui détermine les différens pinceaux envoyés par les objets extérieurs à former autant de foyers derrière le verre, et l'on dispose, à la distance de ces foyers, un carton blanc sur lequel les images se peignent avec netteté et revêtues de toutes leurs couleurs.

1230. La marche des rayons qui produisent ces images est la même que celle qu'on voit *fig.* 177, où AB représente l'objet, *mn* la lentille, et *ab* l'image qui se peint sur le carton. Celle-ci est renversée, parceque les pinceaux de lumière se croisent en traversant la lentille. On peut redresser cette image, en la regardant par réflexion dans un miroir situé horizontalement ou à peu près. Si la chambre obscure est à la portée d'un endroit fréquenté, on aura un tableau mouvant, où tous les objets seront rendus au naturel, ou plutôt on aura une succession de tableaux agréablement diversifiés.

1231. Il est facile de concevoir que plus les objets sont éloignés, et plus leurs images sont petites, puisque l'angle que font entre eux les rayons A*c*, B*d*, qui partent des extrémités de chacun de ces objets diminue sans cesse, à mesure que la distance augmente, d'où résulte une diminution proportionnelle dans l'angle que font les rayons *fb*, *ha*, entre lesquels l'image est comprise. En même temps le foyer *r* formé derrière le verre par les rayons qu'envoie le point R que nous prenons pour exemple, se rapproche de la lentille, et alors l'image de ce point devient la base d'un cône qui résulte du prolongement des mêmes rayons au-delà du foyer. On détruit l'effet de ce cône, en éloignant un peu la lentille du fond de la chambre obscure, pour augmenter la divergence des rayons R*e*, R*l* qui tombent sur le petit espace *el* (884), et les déterminer à se réunir derrière la lentille à une plus grande distance de ce verre. Dans le cas contraire où les objets sont trop rapprochés, eu égard à la position actuelle de la lentille, le fond de la chambre obscure coupe le cône en deçà de son sommet, et l'image du point R prend encore une figure

circulaire, que l'on ramène à n'être plus qu'un point, en rapprochant la lentille du tableau.

1232. On fait des chambres obscures portatives, qui sont des espèces de boîtes carrées, dont une des faces latérales porte un tuyau garni de sa lentille. Les images qui se forment à l'intérieur sont reçues par un miroir plan incliné, qui les réfléchit vers le haut de la boîte, où elles deviennent visibles sur un verre dont la surface extérieure est dépolie, et qui sert de couvercle à la boîte. Ces images sont droites pour un spectateur qui a le visage tourné vers les objets. On a varié de différentes manières la construction de cet instrument : on l'exécute aussi en forme de petite cabane pyramidale, dont la partie supérieure porte le tuyau avec sa lentille, qui, dans ce cas, a une position horizontale. Le miroir est disposé en dessus, et toujours dans une position inclinée, qui, pour être la plus avantageuse qu'il est possible, doit former, avec l'horizon, un angle de 45^{d}. C'est le miroir qui reçoit les rayons partis immédiatement des objets, et les renvoie vers la lentille, au lieu que dans la construction précédente, les rayons vont de la lentille au miroir. Les images se peignent sur un papier blanc placé horizontalement au fond de la chambre obscure ; on les voit par une large ouverture faite à l'une des faces latérales, et que l'on garnit ordinairement de deux petits rideaux, pour que l'observateur, ayant la tête couverte, puisse l'avancer un peu dans la chambre obscure sans y laisser passer de lumière.

Si l'on pratique dans la même partie une seconde ouverture, de manière à y introduire le bras droit, on pourra se servir de la chambre obscure pour dessiner un paysage ou un édifice, en conduisant le crayon sur les traits de l'image que l'on aura devant les yeux.

Lanterne Magique.

1233. La lanterne magique inventée par Kircher, et dont le nom est devenu en quelque sorte trivial par l'usage qu'on

fait de cet instrnment, pour offrir à la curiosité du peuple une apparence de prestige, mérite de fixer l'attention même de ceux pour qni elle n'a rien de magique. Elle consiste dans une caisse de bois ou de fer-blanc, vers le fond de laquelle est une lampe ou une grosse chandelle allumée. Les rayons que lance la flamme sont reçus par une lentille qui les rassemble et les fait tomber plus denses sur un verre plan et mince où l'on a peint diverses figures. Ainsi l'effet de cette première lentille se borne à bien éclairer les figures qui doivent être dans une situation renversée. Quelquefois on substitue à la lentille un miroir concave situé derrière la lumière, et, dans certaines constructions, on combine ensemble les effets de la lentille et du miroir. En avant du verre plan est une seconde lentille, à travers laquelle les pinceaux envoyés par les différens points d'une même figure se croisent, en même temps que la réfraction détermine les rayons dont chaque pinceau est l'assemblage à sortir parallèles. Ces rayons passent ensuite par une ouverture circulaire faite à un carton situé convenablement, et tombent sur une troisième lentille que l'on peut éloigner ou rapprocher à volonté de la seconde, au moyen d'un tuyau mobile, à l'extrémité duquel cette lentille est fixée.

Les rayons qui ont traversé cette même lentille produisent, sur une muraille ou une toile blanche située à l'opposé, une copie en grand des figures tracées sur le verre plan; et il est facile de voir que cette copie représente les objets droits, en conséquence de ce que les pinceaux lumineux se croisent dans la seconde lentille. Deux circonstances contribuent à rendre plus vives les couleurs des images qui s'offrent aux yeux des spectateurs; savoir, la force de la lumière à laquelle est exposé le verre plan, et le cercle lumineux que les rayons émergens vont former sur la muraille.

Fantasmagorie.

1234. Les physiciens, en modifiant la construction et le jeu de la lanterne magique, l'ont transformée en un instrument capable de produire un effet beaucoup plus imposant, auquel ils ont donné le nom de *fantasmagorie*. Ici le mécanisme de l'opération est nul pour les spectateurs, qui n'ont devant les yeux qu'une mousseline gommée, tendue verticalement, qui est comme la toile d'un tableau où les images sont vues par transparence. L'appartement est privé de toute autre lumière que celle qui vient d'un appareil caché derrière cette toile. Au moment où commence l'opération, on voit paraître un spectre d'abord extrêmement petit, qui ensuite s'accroît rapidement, et semble s'avancer à grands pas vers les spectateurs; et lorsque la scène se passe dans un souterrain tapissé en noir, et qu'un morne silence interrompu par les sons lugubres d'un harmonica, a servi de prélude; il est difficile de se défendre d'une certaine impression de frayeur, à la vue d'un objet propre par lui-même à faire illusion, et qui trouve dans l'imagination une place toute préparée pour des fantômes.

1235. Voici maintenant ce qui se passe derrière la mousseline. Soit AB (*fig.* 192), une figure de spectre peinte sur une lame de verre, et placée dans une situation renversée. Cette figure est éclairée, comme dans la lanterne magique, par la lumière d'une lampe, dont les rayons ont passé à travers une lentille que nous supprimons ici (1). De nouveaux rayons, partis des différens points de l'image, traversent successivement deux autres lentilles *mn*, *m'n'*, et le tout est disposé de manière que la lentille *mn* ayant une position fixe, on peut en approcher et en écarter à volonté la lentille *m'n'*, en faisant glisser un tuyau qui porte celle-ci dans celui qu'occupe la première.

(1) On a soin d'appliquer un vernis sur les parties de la lame de verre qui servent de fond à la figure, pour intercepter la lumière qui les traverserait.

De plus, l'appareil entier est mobile, ensorte qu'on est libre de faire varier sa distance par rapport à la toile. La lame de verre étant située en deçà du foyer des rayons parallèles, à une petite distance de la lentille *mn*, les deux extrémités A, B de l'objet peint sur cette lame (1), envoient deux cônes de rayons *iAk*, *dBh*, qui, après s'être réfractés dans la lentille *mn*, en sortent sous des directions *lu*, *sc*, et *fq*, *ge*, moins divergentes; et de plus, ces cônes convergent plus fortement l'un vers l'autre, que quand ils allaient de l'objet à la lentille. Ils sont reçus par l'autre lentille *m'n'*, dans laquelle ils se croisent, et leurs rayons *ta*, *oa*, et *pb*, *xb* en sortent convergens, de manière qu'ils vont peindre sur la toile *zy* les images des points qui les ont lancés, d'où l'on voit que l'image totale doit avoir une position droite, à cause du croisement des cônes dans la seconde lentille.

1236. Il résulte d'abord de ce qui vient d'être dit, que les portions de cônes *lucs*, *fqeg*, font entre elles un plus grand angle que dans le cas où la lentille *mn* étant supprimée, les rayons envoyés par les points A, B, iraient immédiatement vers la lentille *m'n'*, et cette circonstance tend à augmenter, toutes choses égales d'ailleurs, les dimensions de l'image *ab*. D'une autre part, les rayons *lu*, *sc*, et *fq*, *ge* étant moins divergens que dans le cas où la lentille *mn* n'existerait pas, leur concours derrière la lentille *m'n'* se fait plus loin de ce dernier verre, ce qui est encore une circonstance favorable à l'agrandissement de l'image, parcequ'alors il faut mettre une plus grande distance entre l'appareil et la toile. On supplée ainsi à la petitesse de l'objet, en combinant les effets des deux lentilles, dont la première *mn* fait prendre aux rayons qu'elle envoie vers l'autre les mêmes directions que s'ils étaient partis d'un objet beaucoup plus grand.

1237. Concevons que les choses étant dans l'état que représente la figure, l'image *ab* soit nette, et que l'on veuille tout-à-coup la rendre très-petite. Pour y parvenir, on placera l'appareil très-près de la toile *zy*. Mais alors les cônes *oat*, *pbx* étant

(1) Ce que nous disons ici de ces deux points s'applique à tous les autres.

coupés par la toile en dessous de leur sommet, l'image sera confuse. Or, supposons que l'on écarte la lentille $m'n'$ de la première, l'effet sera le même que si le point d'où les rayons lu, sc, ou fq, ge sont censés partir s'éloignait (886). Mais nous avons vu qu'alors les foyers a, b, se rapprochent de la lentille $m'n'$ (884). Donc il sera possible de restituer à l'image diminuée de grandeur toute sa netteté.

Concevons au contraire que l'on veuille rendre l'image beaucoup plus grande que ne le représente la figure. On écartera d'abord l'appareil de la toile. Mais alors les cônes oat, pbx, auront leurs sommets en deçà de cette toile, et l'image sera encore confuse. Or, supposons que l'on fasse mouvoir la lentille $m'n'$ vers la première. L'effet sera le même que si le point d'où les rayons lu, sc, ou fq, ge sont censés partir se rapprochait, auquel cas les foyers a, b doivent s'écarter de la lentille $m'n'$, et ainsi l'image reprendra sa netteté.

1238. Que fait donc l'opérateur? Il dispose d'abord l'appareil à une petite distance de la toile, et alors l'intervalle entre les deux lentilles requis pour la netteté de l'image est à son *maximum*. Il éloigne ensuite progressivement l'appareil, et en même temps il rapproche la lentille $m'n'$ de la première, et cela dans la proportion nécessaire pour que l'image qui s'accroît continuellement soit toujours distincte.

Or les spectateurs, que l'obscurité empêche de s'appercevoir que le lieu de l'image ne change point à leur égard, se laissent séduire par l'illusion qui les porte à croire qu'elle s'approche d'eux, en même temps que ses dimensions augmentent ; et cette illusion a d'autant plus d'empire sur eux que le spectre, en partant d'une petitesse qui le fait paraître d'abord comme un point, parvient rapidement à une étendue considérable, et que leur imagination trompée prend cet accroissement pour l'effet d'un mouvement progressif, à l'aide duquel un objet qu'ils auraient vu, il n'y a qu'un instant, dans le lointain, serait venu se placer près d'eux.

Microscope Solaire.

1239. Le microscope solaire ne diffère proprement de la lanterne magique, qu'en ce qu'il est éclairé par un rayon solaire que l'on introduit dans un endroit obscur, au moyen d'un miroir plan qui le réfléchit horizontalement. Ce rayon passe à travers une lentille adaptée au trou de la fenêtre. On présente à la vive lumière qui sort de cette lentille un petit verre blanc nommé *porte-objet*, et sur lequel on a fixé de petits insectes, des poussières de papillon ou autres corpuscules transparens.

Une seconde lentille, destinée à produire l'image, est couverte, du côté du porte-objet, d'une petite lame de plomb percée d'un trou d'épingle ; c'est par ce trou que passent en se croisant les jets de lumière qui viennent des différens points de l'objet, et voici l'avantage qui résulte de cette construction.

1240. Les jets lumineux dont il s'agit approchent beaucoup d'être des rayons simples ou des cylindres infiniment déliés de lumière, ce qui les rend propres à laisser des empreintes nettes et distinctes sur un plan placé à une distance quelconque ; et quoique la petitesse de l'ouverture ne laisse passer que peu de lumière, comme cette lumière est par elle-même fort éclatante, les images qu'elle produit ne laissent pas d'avoir beaucoup de vivacité.

On peut donc écarter à la distance de trois ou quatre mètres le plan qui reçoit ces images, ce qui en amplifie prodigieusement les dimensions, et change le plus petit insecte en un colosse effrayant. Cependant, à une distance moyenne, les images ont quelque chose de plus net et de mieux prononcé.

1241. Nous venons de parcourir une des branches de la Physique les plus fécondes, et peut-être la plus difficile de toutes à manier. Le fluide et l'organe contribuent également à la compliquer. Le premier, infiniment varié dans sa composition, se modifie encore de mille manières par la diversité

de

de ses mouvemens. Nulle part les phénomènes ne présentent des successions de nuances plus légères, et n'exigent plus de sagacité pour être bien saisis. C'est un fil qui demande à être tenu d'une main assez sûre pour ne pas le laisser échapper, et assez délicate pour ne pas le rompre.

L'organe, de son côté, semble se transformer à chaque instant par la variété des impressions qu'il éprouve. Il a fallu des idées très-fines pour démeler les résultats de tout ce qui se passe en lui, soit qu'il reste abandonné à ses facultés naturelles, soit qu'il les étende à l'aide de ces productions de l'art, qui sont pour lui autant de nouveaux moyens de voir. A en juger par le calcul, rien n'est si simple et si précis que les effets de la vision. Mais combien les lois dont ces effets dépendent se modifient dans leurs applications, et qu'il y a loin de ce que représente la marche des rayons tracée par la géométrie, à la sensation que fait naître l'image dessinée au fond de l'œil par les rayons eux-mêmes!

La théorie de la lumière n'est point épuisée. Plusieurs questions relatives à la vision n'ont pas été completement résolues. Il existe certains phénomènes, comme ceux qui ont rapport à l'électricité, à la phosphorescence, etc., dans lesquels l'action du fluide lumineux n'a pas été expliquée jusqu'à présent; on n'a pas non plus déterminé jusqu'où s'étend l'analogie entre le même fluide et le calorique; le probleme de la double réfraction, sur lequel nous n'avons encore que de simples essais, attend sa parfaite solution d'une main assez habile pour vaincre les grandes difficultés qu'il présente.

Enfin, si l'on considère cette foule de résultats auxquels l'étude de la lumière a conduit les géomètres, les physiciens et les chimistes; si l'on réunit au souvenir de ce qui a été fait, l'expectative de ce qui reste à faire, on conviendra qu'aucun sujet ne se prete à des observations plus étendues et à la fois plus intéressantes, que le fluide dont l'action s'exerce sur l'organe qui nous sert d'instrument pour observer la nature entière.

FIN.

TABLE

DES PRINCIPAUX ARTICLES

CONTENUS DANS CE VOLUME.

4. DE L'ÉLECTRICITÉ GALVANIQUE. pag. 1

VII. DU MAGNÉTISME. 58

1. *Des Principes Généraux de la Théorie du Magnétisme.* 59
2. *De la Loi que suivent les Actions Magnétiques, à raison de la distance.* 62
3. *Des Attractions et Répulsions Magnétiques.* 68
4. *De la Communication du Magnétisme.* 85
5. *Du Magnétisme du Globe Terrestre.* 98
6. *Du Magnétisme des Mines de Fer.* 122
7. *Des différentes Hypothèses imaginées par les Physiciens, sur la cause du Magnétisme qu'exerce le Globe Terrestre.* 128

VIII. DE LA LUMIÈRE. 134

1. *De la Nature et de la Propagation de la Lumière.* 137
2. *De la Réflexion et de la Réfraction de la Lumière.* 149
3. *De la Lumière décomposée, ou des Couleurs.* 192
4. *De la Vision Naturelle.* 276
5. *De la Vision aidée par l'Art.* 304

Fin de la Table des principaux Articles du Tome II.

TABLE ALPHABÉTIQUE

DES MATIÈRES

CONTENUES DANS CE TRAITÉ.

Les chiffres romains désignent les pages de l'Introduction, et les chiffres arabes les Paragraphes de l'Ouvrage.

A.

Aberration de réfrangibilité, occasionnée par la diffusion du foyer qui provient de la différente réfrangibilité des rayons. 1210. Opinion de Newton sur l'impossibilité de la détruire. 1211. *Voyez* Lunette achromatique.

Aberration des étoiles; illusion qui a sa cause dans le mouvement progressif de la lumière, combiné avec celui de la terre dans son orbite, 1086 — 1088.

Aberration de sphéricité, occasionnée par la diffusion du foyer, qui provient de la figure sphérique des verres, 1207. Moyen le plus simple d'y remédier, 1208.

Accélération du mouvement produit par la pesanteur, 36 et suiv.

Accès ou retours de facile réflexion, ou dispositions d'un même rayon à être réfléchi par différentes épaisseurs d'une lame mince d'une substance quelconque, qui sont entre elles comme les termes de la série des nombres impairs, 995.

Accès ou retours de facile transmission, ou dispositions d'un même rayon à être réfracté par différentes épaisseurs d'une lame, qui correspondent aux termes de la série des nombres pairs, 995.

Acier. Reçoit difficilement le magnétisme, et conserve longtemps celui qu'il a une fois acquis, 766.

Aérostats. Moyens impraticables proposés par d'anciens physiciens pour s'élever dans l'air, 462. Premiers aérostats remplis d'air dilaté, 463. Nouveaux aérostats remplis de gaz hydrogène 464. Avantages que l'on a déjà retirés de ces machines pour le progrès de la Physique, 466.

Affinité 31. Observations qui ont suggéré l'idée de cette force, 70 et 71. Preuves qu'elle n'agit qu'à de très-petites distances, 73—77. Equilibre entre les affinités des principes qui forment les combinaisons neutres, 78—81. Comparaison de l'affinité avec la pesanteur, 82—85. Propriétés des corps solides, qui ont du rapport avec l'affinité, 86—101. Newton est le premier qui ait ramené à l'affinité l'explication d'un grand nombre d'effets physiques, 319.

Affolemens de l'aiguille aimantée. *Voyez* Aiguille magnétique.

Aigrette électrique, 573 et 574.

Aiguille aimantée. *Voyez* Aiguille magnétique.

Aiguille magnétique. Action que le globe exerce sur elle, 728, 780 et suiv. Sa déclinaison, 781. Son inclinaison, 782. Variations dans la déclinaison, 783—788. Affollemens de l'aiguille, 789. Variations dans l'inclinaison, 790. Variations dans l'intensité des forces qui sollicitent l'aiguille, 791 et 792. Égalité des forces qui la tirent en sens contraire, 802 et 803. Force directrice de l'aiguille, 804 et 805. La résultante de toutes les forces qui sollicitent ses différentes parties est une constante qui passe toujours par le même point, 806—808. Différence entre l'action du globe et celle d'un aimant ordinaire sur une aiguille magnétique, 809 et 810.

Aiguilles flottantes sur un liquide; phénomènes qu'elles présentent, et leur explication, 345.

Aimant. Idée qu'en avaient les anciens, 720. Découverte de sa polarité, 721. Ses effets comparés en général à ceux des corps électriques, 737. Il offre la preuve que les objets qui ne semblent conduire qu'à des spéculations curieuses peuvent avoir un but d'utilité cachée, 838. *Voyez* Magnétisme.

Aimants artificiels. Manière de les construire, 775. Leurs puissans effets, *ibid.*

Air. Considéré pendant longtemps comme un des quatre élemens, 301 et 391. Preuve de son impénétrabilité, 21. Services qu'il nous rend, 390. Sa composition, 391. Elle est la même à toutes les hauteurs, 466. Expériences qui prouvent sa pesanteur, 392—394. Détermination de sa pesanteur spécifique, *ibid.* Comment on a découvert que sa pression est la cause de l'ascension de l'eau dans les corps de pompe, 395 et suiv. Pression exercée par l'air sur le corps d'un homme de moyenne taille, 396. Inconvéniens qui résultent d'une diminution subite de cette pression, *ibid.*

Élasticité de l'air. Diverses expériences qui servent à la prouver, 401. L'air comprimé se resserre à peu près dans le rapport des poids dont il est chargé, 402. Différens effets qui dépendent de la compression de l'air, 403 et suiv. Manière dont la pression de l'air se combine avec le ressort de ce fluide dans le jeu des pompes, 407 et suiv. Divers effets qui dépendent des mêmes actions, 413. Détermination de la loi suivant laquelle décroissent les densités de l'air, à mesure que ses couches sont plus élevées, 415 et 416. Action du calorique pour le dilater et augmenter son ressort, 230 et suiv. Elle est la cause du double courant d'air qui s'établit dans les appartemens à cheminée, 437. Explication du vent d'est, par une semblable cause, 438. Cause du nuage qui se forme dans un air que l'on raréfie, 450.

Air considéré comme véhicule du son. *Voyez* Son.

Airs de vents, 433.

Alisés (vents); leurs retours périodiques, 434.

Alkohol. L'augmentation de densité qu'acquiert son mélange avec l'eau n'est pas due à l'impénétrabilité, 22. Inconvéniens de son usage dans la construction du thermomètre, 253. S'élève moins que l'eau dans les tubes capillaires, 316. Effets particuliers de sa flamme relativement à la transmission de l'électricité galvanique, 693 et 694.

Alliage. Modère la ductilité des métaux précieux, 100. Accroît leur dureté, *ibid.*

Amplitude d'aberration, ou distance entre les deux rayons provenus de la double réfraction, prise sur la seconde surface du milieu réfringent, 1146.

Angle d'incidence de la lumière dans le cas de la réflexion, 857; dans le cas de la réfraction, 868.

Angle de réflexion de la lumière, 857.

Angle de réfraction de la lumière, 868.

Angle réfringent du prisme des iné aux expériences sur la lumière, 927.

Angle visuel, formé par les deux rayons, qui, en partant des deux extrémités d'un objet, viennent se croiser dans la prunelle, 1065.

Anguille de Surinam ou gymnote engourdissant. Sa vertu électrique, 705. Expérience à l'aide de laquelle Walsh a vu paraître une étincelle, au moment de la décharge de ce poisson, 706.

Anneaux colorés. Séries de cercles de différentes couleurs que présente une lame d'air très-mince, renfermée entre la courbure d'un objectif légèrement convexe, et la surface plane d'un second qui est plan convexe, 979. Rapports entre les diamètres des anneaux, 980. Rapports entre ceux des cercles intermédiaires, pris aux endroits où les couleurs s'obscurcissent, 981. Augmentation ou diminution des diamètres des anneaux, suivant les différentes inclinaisons du rayon visuel, 982. Autres anneaux colorés vus par réfraction aux endroits de ces cercles intermédiaires, 983. Effets produits par l'eau substituée à l'air, 984 et 985. Expérience qui offre comme l'analyse du phénomène des anneaux colorés, 986—992. Conséquences déduites des observations précédentes, relativement à la coloration des corps, 996 et suiv. Difficultés qui paraissent infirmer ces conséquences, et réponses que l'on peut y faire, 1021 et suiv.

Anomalies dans l'électrisation de certains corps par le frottement, 530 et 531.

Appareil pour les expériences électriques, faites à l'aide de la chaleur, 616. Appareil à couronnes de tasses, 665.

Arc animal. *Voyez* Electricité galvanique.

Arc-en-ciel. Sa description, 955. Assez souvent on aperçoit deux arcs, l'un intérieur, l'autre extérieur, *ibid.* Explication de l'arc intérieur, produit par les rayons efficaces de chaque couleur, ou ceux qui sont tellement situés que l'angle formé par les émergens avec les incidens est un *maximum*, 957, 964, 965. Explication de l'arc extérieur, où l'angle formé par les rayons efficaces émergens avec les incidens est un *minimum*, 960—962, 966. Largeurs des deux arcs, et cause de leur augmentation, 967—969. Circonstances qui font varier la grandeur de l'arc-en-ciel, 970. Troisième arc-en-ciel que l'on aperçoit quelquefois, 972. La théorie indique la possibilité d'une infinité d'autres arcs, qui ne peuvent être sensibles, *ibid.* Arcs produits par des rayons dispersés, 973. Expérience à l'aide de laquelle Antoine de Dominis avait représenté le phénomène de l'arc-en-ciel, 956 et 974. Manière de l'imiter par une pluie artificielle, 975. Divers effets qui en offrent comme la copie, *ibid.* Solution d'une difficulté tirée des accès de facile réflexion et de facile transmission, relativement à la possibilité de l'arc extérieur, 1013.

Arc excitateur. *Voyez* Electricité galvanique.

Are. Unité des mesures superficielles, 65.

Aréomètre. Ses différentes espèces, 52 et suiv.

Argent allié au cuivre. Dilatation du mélange, 22. Rang qu'occupe l'argent dans l'ordre des élasticités, duretés et ductilités des métaux les plus usuels, 98.

Art de voler, refusé à l'homme, 461.

Atmosphère. Poids auquel équivaut sa pression sur le corps d'un homme de moyenne grandeur, 396. Loi suivant laquelle décroissent les densités de ses différentes couches prises de bas en haut, 415 et 416. Différentes modifications dont elle est susceptible, 431 et suiv. Atmosphère considérée relativement à l'évaporation, 442 et suiv. Son influence pour augmenter la quantité de vapeur répandue depuis la surface de la terre jusqu'à une hauteur donnée, 446. *Voyez* Air. Quelle serait sa hauteur, si sa densité était uniforme, 400. Comment on a essayé de la déterminer, à l'aide de la réflexion occasionnée par le crépuscule, 905 et 906.

Attraction. Phénomènes qui ont suggéré l'idée de ce mot, 29. Sa division en deux espèces, 31. Loi à laquelle est soumise celle qui agit

à des distances sensibles, 40. Application de cette loi à l'attraction d'un corps sphérique, 41 ; et à celle d'un corps d'une forme quelconque, 42.
Attractions dans les petites distances. *Voyez* Affinité.
Attraction moléculaire. *Voyez* Affinité.
Attractions et répulsions apparentes des petits corps qui flottent sur l'eau à une petite distance les uns des autres ; leur véritable explication, 343 et 344.
Attractions et répulsions dans les petites distances. Combien leur domaine est étendu dans la nature, 319 et 904. En quoi elles diffèrent des qualités occultes des anciens, 904.
Attractions et répulsions électriques, 557 et suiv.
Attractions et répulsions magnétiques, 737 et suivantes.
Aurore boréale. Sa description, 854. Diverses opinions sur la cause de ce phénomène, 855 et 856. Influence qu'elle paraît avoir sur les affollemens de l'aiguille aimantée, 789.
Axes optiques, 1056. Leur usage dans l'explication des phénomènes de la vision, 1067.
Azote (Gaz) ; un des principes composans de l'air ; modère l'activité du gaz oxygène, 391.

B.

Balance. Moyen de peser exactement avec une fausse balance, pourvu qu'elle soit mobile, 62.
Balance électrique. Sa description, 535 et suiv.
Balance hydrostatique. Son usage, 47—49.
Bandes sans déclinaison, 784.
Baromètre. Son origine, 395. Sa construction, 397 et 398. Son échelle comparée avec celle du thermomètre, 399. Son usage pour la mesure des hauteurs, 414 et suiv. Méthode de Deluc, 417—419. Méthode de Laplace, 420 et suiv. Détermination du coefficient constant, 421 et 422. Corrections relatives à la température, 423 et 424. Application à un cas particulier, 425. Corrections relatives à la pesanteur, 426—428. Circonstances les plus favorables au succès de l'opération, 429. Avantages que l'on pourrait tirer des opérations faites avec le baromètre, pour la topographie des divers pays, 430. Ses variations ne sont exactement en rapport qu'avec les pressions de l'air, et n'indiquent pas d'une manière certaine les changemens de temps, 457.
Barreau magnétique. *Voyez* Magnétisme.
Batterie électrique. Ses effets et leur explication, 593 et 594.
Bismuth. Sa cristallisation, lorsqu'il passe de l'état de fusion à celui de solidité, 379.
Boussole (Aiguille de). *Voyez* Aiguille magnétique.
Bouteille de Leyde, 579 et suiv.
Brouillards. Leur formation, 448. Leur disparition, 449.

C.

Calorimètre. Sa description et ses usages, 186—189.
Calorique, 136. Deux opinions sur sa nature, 137. Ses principales propriétés, 138. Son équilibre, 151 et suiv. Loi à laquelle est soumise sa propagation par l'intermède des corps solides, 175 et 176. Ses effets pour produire dans les corps un changement d'état, 190 et suiv. Considération sur ces effets, 206—207. Manière dont la compression et la dilatation agissent sur le calorique renfermé dans les corps, 215 217. Résultat de Newton, qui s'applique à la quantité de calorique dégagée ou absorbée dans les mêmes circonstances, 218—221. Explication de divers phénomènes relatifs au même sujet, 222—225. Limites

des phénomènes dont il s'agit, par rapport aux liquides et aux solides, 226 et 227. Différence entre l'effet de la compression et celui du refroidissement, 228 et 229. Loi à laquelle sont soumis les fluides élastiques dans la variation de leur volume et de leur ressort, par l'action du calorique, 230 et suiv.
Calorique latent, 147 et 148. *Id.*, 194. *Id.*, 196. Diversité d'opinions sur sa manière d'agir, 201.
Calorique rayonnant. Ses principales propriétés, 143 et suiv. Effets de la réflexion sur la surface des miroirs concaves, 164 et 165. Influence du poli et de l'éclat des surfaces sur sa réflexion, 166 — 168. Influence des différentes natures des substances sur le même effet, 169 — 171. Exposé succinct des théories admises par MM. de Rumfort et Leslie, pour expliquer ces effets, 179 — 181.
Calorique sensible, 147 et 148. Distinction entre sa manière d'agir et celle du calorique latent, 149 et 150.
Calorique spécifique, 182 et suiv. Manière de le déterminer, à l'aide du calorimètre, 186 — 189.
Capacité de calorique, 156 — 158.
Carillon électrique. Explication de ses effets, 563.
Carreau magique ou fulminant, 592.
Catoptrique. Science des rayons réfléchis, 841.
Caves. Pourquoi nous les trouvons froides pendant l'été, et chaudes pendant l'hiver, 161.
Caustiques par réflexion, 1102 et suiv.
Caustiques par réfraction, 1175.
Centre d'action. Ce que c'est, 41. Position des centres d'action dans une tourmaline, 619. Dans un aimant, 732 et 755.
Centre d'action magnétique du globe terrestre. Résultats qui tendent à prouver qu'ils sont à une distance presque infiniment petite du centre même de la terre, 793 — 801. Accord entre ces résultats et l'hypothèse qui assimile le globe à un aimant, 836.
Chaleur. Ce qu'on entend par ce mot, 136.
Chaleur (Capacité de). *Voyez* Capacité de calorique.
Chaleur latente. *Voyez* Calorique latent.
Chaleur sensible. *Voyez* Calorique sensible.
Chaleurs spécifiques des corps. *Voyez* Calorique spécifique.
Chambre obscure, ou Chambre noire. Son origine, 1229. Explication de ses effets, 1230 et 1231. Description d'une chambre obscure portative 1232.
Champ d'une lunette, 1203.
Charge par cascade, ou manière dont plusieurs bouteilles de Leyde se chargent les unes les autres, par une suite de la communication qu'elles ont entre elles, 593.
Chimie. Objet de cette science, j. Ses points de contact avec la Physique, ij.
Choc en retour, ou commotion que l'on ressent quelquefois à une distance plus ou moins sensible de l'endroit où se fait une décharge électrique, 613. Circonstances dans lesquelles, cet effet a lieu par l'action de la foudre, 614.
Cobalt. Il paraît doué par lui-même des propriétés magnétiques, 825.
Combustion. Manière dont les anciens physiciens l'expliquaient, 291. Sa véritable cause, *ibid.*
Commotion électrique par la bouteille de Leyde, 579. — Par la pile de Volta, 668 — 671. En quoi l'une diffère de l'autre, 677. *Voyez* Electricité.
Compression. Ses effets sur le calorique renfermé dans les corps, 215 et suiv. Différence entre les mêmes effets et ceux du refroidissement, 228 et 229.
Condensateur électrique. Ses effets, 604.
Conducteur d'une machine électrique, 524.
Conducteurs (Corps) de l'électricité, 518. Distribution méthodique de ces corps, 696.
Conducteurs humides employés dans la pile de Volta, 647.
Congélation de l'eau. Augmentation de volume que subit l'eau lorsqu'elle approche du terme de la congélation, 366. Détermination du degré auquel répond le *maximum* de

densité, 367. Opinion sur la cause de la dilatation de l'eau congelée, 371 et 372. Effets de la force expansive de l'eau congelée, 373 et suiv.

Congelation du mercure. *Voyez* Mercure.

Contact immédiat. N'existe pas entre les molécules des corps, 8.

Contraction des corps, produite par la compression, 215 et suiv. Contraction due aux variations de la température, 242, et suiv.

Cor de chasse. Échelle musicale de cet instrument, 502.

Corde sonore. *Voyez* Sons comparés.

Corps conducteurs, et non conducteurs. *Voyez* Électricité.

Couleurs accidentelles. En quoi elles consistent, 1030. Expériences à l'aide desquelles on les fait paraître, 1031 — 1033 Principe sur lequel est fondée leur détermination, d'après la connaissance de la couleur qui résulte d'un mélange donné de couleurs homogènes, 1034 et 1035. Application de ce principe à un cas quelconque, 1037 et 1038. Explication physique de la sensation produite par les couleurs accidentelles, 1039 et 1040.

Couleurs considérées dans la lumière, 925 et suiv. Expériences qui prouvent la différente réfrangibilité des rayons réfléchis par les corps, 930 et suiv. Autres expériences qui prouvent que la lumière est composée d'une infinité de rayons différemment réfrangibles, relatifs à une gradation de nuances de couleurs que l'on peut rapporter à sept espèces, 933—941. Nouvelle expérience confirmative des précédentes, à l'aide de la lumière en partie réfléchie, et en partie réfractée, au point d'incidence sur la base intérieure du prisme, 942 et 943. Dans quel sens on doit entendre les expressions de *rayons rouges, bleus, violets*, etc., 944. Couleurs du spectre solaire ramenées à leur plus grande simplicité, 945 Détermination du rapport entre les sinus d'incidence et de réfraction des rayons qui donnent les limites des sept couleurs principales, 947 — 949. Analogie entre la suite des sinus de réfraction relatifs à ces limites, et celle des nombres qui représente notre échelle musicale dans le mode mineur, 948. L'assemblage de toutes les couleurs produit le blanc, 950 Expérience remarquable de Newton relativement à cet objet, 951. Combien est peu fondée l'opinion de ceux qui n'ont admis que trois couleurs dans la lumière, 952. Explication des effets que présentent les couleurs des objets vus à travers un prisme, 953 et 954.

Couleurs considérées dans les corps, dépendent en général de la disposition qu'ont ces corps à réfléchir telle espèce de rayons plus abondamment que les autres, en absorbant tout le reste, 976. Cette disposition dépend, toutes choses égales d'ailleurs, du degré de ténuité des particules dont les corps sont composés, 996 et suiv. Les couleurs sont d'autant plus vives, que les particules sont plus minces, 1003. Cause des reflets irisés qu'on observe dans certains minéraux, 1004. Cause de la différence entre les corps dont les couleurs, vues sous différens degrés d'obliquité, sont permanentes, et ceux qui, dans le même cas, offrent des couleurs changeantes, 1005 et 1006. Couleurs produites dans certaines liqueurs qui n'en avaient aucune sensible, par le mélange de l'une avec l'autre, ou changement d'une couleur préexistante, qui a lieu dans le même cas, 1008. Couleurs des corps transparens, 1009. *Voyez* Anneaux colorés.

Couleurs de l'arc-en-ciel. *Voyez* Arc-en-ciel.

Courbes magnétiques, produites par l'arrangement que prennent des parcelles de limaille de fer disséminées sur un plan au dessous duquel on a placé verticalement deux barreaux aimantés, 746. Explication de ce phénomène, 747 et 748.

Couronne d'or (Problème de la), proposé à Archimède, 46 et 50.

Cristal de roche. Cause des couleurs d'iris qu'il présente aux endroits où il est fendillé, 1004.

Cristallin. Espèce de lentille enchâssée dans l'œil, derrière le trou de la prunelle, 1055.
Cristallisation. En quoi elle consiste, 102.
Cristallisation des métaux, à l'aide du refroidissement qui suit leur fusion, 379.
Cristaux. Ce qu'on entend par ce nom, 4.
Cristaux (Formes primitives des), 105. Formes secondaires, *ibid.* Manière de déterminer les formes primitives, 106 et suiv. Formes des molécules intégrantes des cristaux, 111 et suiv. Exposé des lois auxquelles est soumise la structure des cristaux de formes secondaires, 119 et suiv. Généralité de la théorie relative à ces lois, 132 — 135.
Crown-glass. Espèce de verre de la nature du verre ordinaire, 1225.
Cuivre. Rang qu'il occupe dans l'ordre des propriétés des métaux les plus usuels, 98.

D.

Décharge d'une bouteille de Leyde, 583 et 590.
Déclinaison de l'aiguille aimantée. *Voyez* Aiguille magnétique.
Décroissemens (Lois de) auxquelles est soumise la structure des cristaux; leur détermination, 119 et suiv. Leur fécondité, 131.
Densité. Ce qu'on entend par ce mot, 7.
Diamant. Sa dureté, 87. Comment Newton avait en quelque sorte deviné que cette substance était combustible, d'après sa grande puissance réfractive, 908 et 909. Raison de croire, d'après les expériences de Biot, sur la réfraction, que le diamant n'est pas uniquement composé de carbone, 920 et 921.
Dilatation des corps, dépend d'une portion de calorique qui devient latente, 147. Développement de ce sujet, 215 et suiv. Dilatations de divers corps solides par les variations de la température, 242 — 247.
Dilatation des gaz et des vapeurs, depuis le degré de la glace fondante jusqu'à celui de l'eau bouillante. Suivant quel rapport elle a lieu, 230 et suiv. Raison de l'uniformité de la loi qu'elle suit relativement aux différens fluides, 238. Dilatation des gaz par leur mélange avec les vapeurs; manière de la déterminer, 268 — 273.
Dioptrique, ou science de la lumière réfractée, 841. Progrès de la dioptrique, 1133 et suiv.
Dispersion de la lumière, ou quantité dont se dilate un rayon de lumière, par l'effet de la réfraction, 1219. Elle ne suit pas le rapport de la réfraction moyenne dans les différens milieux, *ibid.*
Disthène, ou Cyanite. Anomalies que présente cette pierre, relativement à l'électricité qu'elle acquiert à l'aide du frottement, 531.
Divisibilité. En quoi elle consiste, 23.
Division mécanique d'un minéral, 106.
Division des corps. Diverses expériences qui prouvent jusqu'à quel point elle peut s'étendre, 24 et suiv. Belle idée de Newton sur les bornes qui lui sont prescrites, dans l'état actuel des choses, 28.
Double réfraction. *Voyez* Réfraction.
Dureté. En quoi elle consiste, 86. Ses rapports avec l'élasticité, 93.
Ductilité. En quoi elle consiste, 97. Ses différentes manières d'être, 99. Est une qualité précieuse relativement à l'usage des métaux dans les arts, 100.
Durs (Corps), 88.

E.

Eau. Ses principales propriétés physiques, à l'état de liquidité, 292. Ses services, 293. Elle a été regardée pendant longtemps comme un élé-

ment, 294. Sa composition, *ibid.* Ses différens degrés de pureté, 295. Elle est sensiblement incompressible, 296. Newton, en comparant sa puissance réfractive avec celle des autres substances, avait entrevu que ce liquide renfermait un principe inflammable, 910. Sa décomposition par l'électricité galvanique, 710; par l'électricité ordinaire, 714.

Eau à l'état de glace. Phénomènes qui accompagnent le passage à cet état, 356 et suiv. Circonstances où l'eau reste liquide au-dessous du terme de la congélation, 360 et suiv. Origine de l'opinion que l'eau qui a bouilli se gèle plus facilement que celle qui n'a point été exposée au feu, 362. *Maximum* de densité de l'eau, 366 et suiv. Cause de l'augmentation de volume que subit l'eau en se congelant, 371 et 372. Force expansive de la glace, 373 — 375.

Eau à l'état de vapeur. Circonstances qui accompagnent le passage à cet état, 195 et suiv. Cause de la chaleur que le contact de l'eau vaporisée excite dans les corps, 381. Dans quel rapport l'eau se dilate en se vaporisant, 383. Effets de l'eau vaporisée dans l'éolipile, 384. Action du même fluide pour produire les mouvemens des machines à vapeur, 386 et suiv.

Ebullition. Comment elle se produit, 197. Elle est le signe de la vaporisation naissante, *ibid.* Elle a lieu à différentes températures, suivant que la pression varie, 208 et 380.

Echelle diatonique. Sa formation, 494.

Echos. Leur explication, 480.

Élasticité. En quoi elle consiste, 89. Sa cause encore inconnue, 94. Ses variations dans les différens corps, 96.

Elastique. Idée de la courbe à laquelle on a donné ce nom, 330.

Elastiques (Corps), 89. Comment se fait leur retour à leur premier état, 90 — 92. Leur utilité dans les arts, 95.

Élastiques (fluides). *Voyez* fluides élastiques.

Electricité. Exposé succinct de ses progrès, 515 et suiv. Division des corps relativement à l'électricité, en corps conducteurs ou analectriques, et corps non-conducteurs ou idio-électriques, 519 et suiv. Ce que c'est qu'un corps isolé, 520. Principes sur lesquels est fondée la construction de la machine électrique, 524. Hypothèse de deux fluides différens, dont la réunion forme le fluide électrique, 525 et 526. Idée des deux électricités, l'une positive l'autre négative, admises par Franklin, 527. Actions de ces deux électricités remplacées par celles des fluides vitré et résineux, *ibid.* Différence entre l'hypothèse relative à ces deux fluides, et le système des effluences et des affluences, 528. Diversité dans les résultats du frottement entre deux corps idio-électriques, relativement à l'espèce d'électricité que chacun d'eux acquiert, 529 — 531. Circonstance dans laquelle le taffetas gommé acquiert l'électricité vitrée, 532. Ce qu'on entend par tension électrique, 533. Expériences qui prouvent que les actions électriques suivent la raison inverse du carré de la distance, 534 et suiv. Il en résulte que tout le fluide d'un corps conducteur est répandu sur la surface de ce corps, 539 et suiv. Manière dont le fluide électrique se distribue entre différens corps en contact les uns avec les autres, 545 et suiv. Lois suivant lesquelles les corps idio-électriques perdent peu à peu leur électricité, 552 et suiv. Attractions et répulsions électriques, 557 et suiv. Les corps sollicités par des électricités hétérogènes s'attirent, et il y a répulsion lorsque les électricités sont homogènes, 557 — 559. Equilibre électrique de deux corps, dépend de quatre forces, 560. Action d'un corps électrisé sur un autre corps qui était primitivement à l'état naturel, 561. Application des principes précédens aux effets du carillon électrique, 563. Cas où l'attraction est suivie d'une répulsion, 564. Action réciproque de deux corps idio-électriques, dans chacun desquels le fluide naturel est décomposé, 565. Attractions et répulsions simultanées qu'exercent les corps électrisés

sur des corps légers situés dans leur aphère d'activité, 566. Considérations en faveur de l'hypothèse d'un double fluide électrique, fondées sur la difficulté d'expliquer la répulsion des corps électrisés négativement, lorsqu'on n'admet qu'un seul fluide, 567. Pouvoir des pointes pour lancer ou soutirer avec force le fluide électrique, 568 et suiv. Aigrette électrique, 573 et 574. Etincelle électrique, 575. Pistolet électrique, 576. Effets de l'électricité dans le vide, 577. Odeur électrique, 578. Expérience de Leyde; manière de la faire, 579. Idée générale de la cause d'où dépend la commotion, 581. Explication détaillée du phénomène, 582 et 583. Les quantités de fluide vitré et résineux qui s'échappent des deux surfaces d'une bouteille que l'on décharge par des contacts successifs, suivent une progression géométrique, 584. Propagation sensiblement instantanée de la commotion, 585. Pourquoi la bouteille ne se charge pas quand elle est isolée, 587. La bouteille s'électrise d'autant plus fortement, toutes choses égales d'ailleurs, qu'elle est plus mince, 588. Causes des nouvelles commotions qui ont lieu quelque temps après que la bouteille a été déchargée, 589. Manière de charger la bouteille résineusement, 591. Expérience du carreau magique ou fulminant, 592. Charge par cascade, ou celle qui a lieu lorsque plusieurs bouteilles suspendues l'une à l'autre se chargent mutuellement, 593. Effets des batteries électriques pour brûler les métaux ou les réduire en poudre, etc., 594. Explication de ces effets, 595. Manière de ramener à la théorie des deux fluides certains phénomènes qui paraissent la contrarier, 596 et suiv. Théorie des effets de l'électrophore, 600 et suiv. — Du condensateur, 604. — De l'électromètre, 605 et 606. Instrument dans lequel les effets de l'électromètre se combinent avec ceux du condensateur, 607. Décomposition de l'eau par l'électricité, 714.

Electricité galvanique, 626 et suiv. Son origine, 627. Expériences de Galvani sur les grenouilles, 629 et suiv. Autres expériences du même genre, faites par divers physiciens, 632 et suiv. Arc animal et arc excitateur; ce qu'on entend par ces mots, 632. De quelle manière on a d'abord expliqué les expériences sur les grenouilles, 639 et suiv. Théorie de Volta, 643 et suiv. Véritable principe de l'électricité galvanique, découvert par ce physicien, 645. Manière de représenter par des nombres les états de deux disques qui sont devenus électriques par leur contact mutuel, 646. Effets des conducteurs humides, 647 et 648. Manière dont Volta conçoit l'effet du contact, 650. Construction de la pile de Volta, et développement de la loi suivant laquelle varient les quantités de fluide de ses différens disques, 651 — 653. Différence entre une pile isolée et celle qui ne l'est pas, 654—662. En quoi consiste le véritable élément de la pile, 663. Analogie entre une tourmaline devenue électrique par la chaleur et la pile, 664. Appareil à couronnes de tasses; en quoi il consiste, 665. Aperçu de Newton sur une action électrique, analogue à celle qui a lieu dans l'électricité galvanique, 666. Commotion produite par la pile, 669. On en augmente l'énergie, en employant des corps humides imbibés d'une dissolution saline, 671. Manière de charger une bouteille de Leyde avec la pile, 672. Attractions produites par la pile, 673. Etincelles excitées par le contact d'un fil métallique avec la pile, 674. Combustion d'un fil de fer, dans le même cas, *ibid.* Comparaison entre les effets de deux piles formées d'un nombre égal de disques, mais dont les diamètres diffèrent sensiblement, 675 — 678. Effets de la pile comparés avec ceux d'une forte batterie électrique, 679. Différentes substances qui peuvent être employées pour former la pile, 680 et suiv. Gradation remarquable que présentent plusieurs métaux superposés relativement à leurs différences d'état, 681. Effets des piles

secondaires, 685 et suiv. Substances qui ont, par rapport à l'électricité galvanique, une faculté conductrice particulière, 690 et suiv. Manière d'envisager les phénomènes produits par ces corps, 698. Poissons électriques, 699 et suiv. *Voyez* Torpille. Décomposition de l'eau par l'électricité galvanique, 710 et 711. Explication la plus naturelle qu'on ait donnée jusqu'ici de ce phénomène, 712 et 713. Expériences qui prouvent que l'oxidation des disques métalliques de la pile n'a aucune influence sensible sur la production de l'électricité, 715 et suiv. Parallèle entre l'électricité ordinaire, où tout indique que les effets de l'une et de l'autre dépendent d'un même fluide, 719.

Electricité naturelle, 608 et suiv. Expériences qui ont servi à constater l'identité de la matière de la foudre et du fluide électrique, 608 et 609. Effets des paratonnerres, et manière de construire ces instrumens, 610 et 611. Preuves de leurs avantages, 612. Effets du *choc en retour* ou de la commotion que l'on ressent à une distance plus ou moins grande de l'endroit où se fait la décharge électrique, 613. Cet effet a lieu quelquefois par l'action de la foudre, 614.

Electricité produite par la chaleur, 615 et suiv. Pôles électriques des corps susceptibles de ce mode d'électrisation, 616. Appareil imaginé pour les distinguer, *ibid.* Explication des phénomènes que présente la tourmaline, 617 et suiv. Corrélation entre les positions des pôles dans les mêmes corps, et les formes des parties dans lesquelles résident ces pôles, 624. Effets des cristaux de magnésie boratée qui ont huit pôles électriques, 625.

Electromètre. Sa description, 605 et 606. Combiné avec le condensateur, 607.

Electrophore. Sa description et ses effets, 600 et 601. Manière de le convertir en un tableau qui présente des dessins formés de deux poussières, l'une de *minium* et l'autre de soufre, 602 et 603.

Elémens. Raisons spécieuses des anciens philosophes pour n'en admettre que quatre, 294.

Eolipile. Explication de ses effets, 384.

Equateur magnétique, 790.

Etain. Rang qu'il occupe dans l'ordre des propriétés des métaux les plus usuels, 98

Etendue. Sa notion ramenée à ce que nous apprend l'observation, 3.

Etincelle électrique, 575. Son action pour enflammer l'alkohol ou l'éther. *ibid.*

Euclase. Espèce de pierre remarquable par la fragilité qui accompagne sa dureté, 88.

Evaporation. Circonstances qui la déterminent, 195. Théorie de le Roy sur ce sujet, 279—282. La même théorie modifiée depuis, d'après de nouvelles observations, 284 et 285. Théories de Deluc et de Dalton, 286 et 287. Théorie de Laplace, seule admissible, 288—290. Circonstances d'où dépend la quantité de l'évaporation, 442 et 443. Evaporation de la glace, 445. L'évaporation diminue la pesanteur spécifique de l'air, 274. Elle est la cause de l'origine des fontaines, 459 et suiv.

Excitateur. Son usage pour décharger une bouteille de Leyde, 590.

Expérience de Leyde, 579 et suiv. *Voyez* Electricité.

Explication des phénomènes, doit descendre dans les détails pour être satisfaisante, xxvj.

Extinction du feu par l'injection de l'eau; qu'elle en est la cause, 382.

F.

Faculté conductrice des corps, relativement au calorique, 159—161.

Fantasmagorie. En quoi consiste l'espèce d'illusion ainsi appelée, 1234. Son explication, 1235 et suiv.

Fer. Rang qu'il occupe dans l'ordre des principales propriétés des métaux les plus usuels, 96. Il se prête d'autant moins au mouvement du fluide magnétique dans son inté-

vient, qu'il est plus dur, 766. *Voyez* magnétisme et mines de fer.
Feu. Ce que l'on entend communément par ce mot, 291.
Figures des corps, 4.
Flint-Glass. Espèce de verre composé en partie de *minium*, 1225.
Fluide électrique. *Voyez* Electricité.
Fluide magnétique. *Voyez* Magnétisme.
Fluides aériformes; leur notion, 203.
Fluides élastiques; leur division en plusieurs classes, 203. Loi à laquelle est soumise la variation de leur volume et de leur ressort, par l'action du calorique, 230 et suiv. Circonstances qui les déterminent à s'unir par voie de simple mélange, ou par celle de combinaison intime, 290. *Voyez* Evaporation et Vapeurs.
Fluidité élastique; passage des corps à cet état, 195—197. Explication de divers phénomènes relatifs au passage dont il s'agit, 208—214.
Flûtes. Principe auquel se rapporte la construction de ces instrumens, 505.
Fontaine de compression. Ses effets, 401.
Fontaine intermittente. Ses effets, 406.
Fontaines. Diverses opinions sur la manière dont elles se produisent, 458. Leur véritable origine est due à l'évaporation, 459 et suiv.
Force ou puissance; ce qu'on entend par ce mot, 13.
Force coercitive, considérée dans les corps idio-électriques, 552.—Dans les corps magnétiques, 731.
Force de torsion. En quoi elle consiste, 534.
Force directrice d'une aiguille aimantée, 804.
Foyer des rayons parallèles, lorsque la lumière se réfléchit sur la concavité d'une surface sphérique, 862. Foyer des rayons divergens dans le même cas, 864. Foyer des rayons divergens, après leur réfraction dans un milieu terminé par une seule surface courbe, 872 et suiv. Cas où le milieu est terminé par deux surfaces courbes opposées, 881 et suiv. Foyer des rayons parallèles dans le même cas, 882. Les mouvemens des foyers produits par les rayons réfractés, ont toujours lieu suivant la même direction que ceux du point radieux, 877, 880 et 884.
Foyer imaginaire, 876.
Foyer virtuel, 876.
Fragiles (corps), 88.
Franc. Unité monétaire du nouveau système métrique, 69.
Froid. Consiste dans la privation de la chaleur, 161. Expérience qui présente une fausse apparence d'un froid réfléchi, 165.
Frottement, employé pour estimer la dureté des corps, 86 et 88. Cause de la chaleur qu'il dégage, 227.
Fumée, sa formation, 447.

G.

Galvanisme. *Voyez* Electricité galvanique.
Gamme. *Voyez* Sons comparés.
Gaz. Leur notion, 203. Méthode pour déterminer le rapport suivant lequel l'élasticité ou la dilatation d'un gaz s'accroît, à une température donnée, par son union avec une vapeur dont on connaît l'élasticité, à la même température, 268 et suiv.
Gaz ammoniaque. Manière dont sa composition chimique a été vérifiée, à l'aide de la réfraction, 918.
Gaz hydrogène. Son usage dans la construction des aérostats, 464. Expériences qui prouvent la grande puissance réfractive de ses molécules, 914.
Gaz insolubles. Rapport suivant lequel ils se dilatent, depuis la température de la glace fondante jusqu'à celle de l'eau bouillante, 235.
Gaz solubles. Rapport de leur dilatation entre les mêmes limites, 237. Raison de l'uniformité à laquelle est soumise la dilatation des gaz, 238.
Gelée. Combien elle est nuisible à la végétation, 375.
Glace. *Voyez* Eau à l'état de glace.
Globe terrestre. Fait la fonction d'un véritable aimant, 727, 728, 780 et suiv. Son action sur une aiguille

que l'on porte successivement à différens points de sa surface; déclinaison de l'aiguille, 781. Elle varie d'un lieu à l'autre, 783. Elle est nulle à plusieurs endroits, 784. Elle varie avec le temps dans un même lieu, 785. Ses variations comparées entre elles à divers points du globe, suivent des rapports différens, 787. Inclinaison de l'aiguille, 782. Ses variations d'un lieu à l'autre, 790; et par succession de temps dans un même lieu, *ibid.* Affollemens de l'aiguille aimantée, 789. Variations dans l'intensité des forces qui sollicitent l'aiguille, 791 et 792. Résultats sur les positions des centres d'action magnétique du globe, 793—801. Action du globe terrestre pour communiquer le magnétisme aux verges de fer et autres corps semblables, dont la force coercitive n'est pas assez grande pour s'opposer à cette action, 811, 816 et 817. Expérience remarquable qui prouve la facilité avec laquelle le fer doux se prête à cette même action, 812 — 814. Solution du problème qui consiste à aimanter des barreaux d'acier jusqu'à saturation, sans avoir eu préalablement aucun aimant entre les mains, 815. Diverses hypothèses à l'aide desquelles on a essayé d'expliquer les variations de l'aiguille aimantée, 826 et suiv. Ce qui reste à faire pour perfectionner la théorie du magnétisme, 837.

Globe terrestre. Magnétisme des mines de fer qu'il renferme. *Voyez* Mines de fer.

Gnomonique. Principe sur lequel cette science est fondée, 852.

Gramme. Unité de poids dans le nouveau système métrique, 60 et 68.

Grandeur apparente d'un objet, 1066.

Grandeur réelle d'un objet, 1066.

Gravité. *Voyez* Pesanteur.

Grêle. Sa formation, 455. En quoi elle diffère de la neige, *ibid.*

Grenouilles (Expériences sur les), ont fait naître les premières connaissances sur l'électricité galvanique, 629 et suiv.

Gymnote engourdissant, espèce de poisson électrique, 705 et 706.

H.

Haleine des animaux. Pourquoi elle est visible dans les temps froids, 452.

Harmoniques (Sons). *Voyez* Sons comparés.

Hauteurs. Méthodes pour les mesurer à l'aide du baromètre, 414 et suiv.

Herborisation que présentent certaines pierres. Comment elles sont produites, 355.

Histoire naturelle. Objet de cette science, ij. Sa division en trois branches principales, *ibid.*

Horloges. Changemens occasionnés dans la longueur de leur pendule, par les variations de la température; moyen d'y obvier, 245.

Humidité. En quoi elle consiste, 297.

Hydrogène, un des principes de l'eau, 294. Usage du gaz hydrogène, dans la construction des aérostats, 464.

Hydrophane. Preuve de sa porosité, tirée d'une expérience faite avec cette pierre, 9. Cause de la transparence qu'il acquiert, lorsqu'il est plongé dans l'eau, 1016.

Hygromètre. Sa définition, 297. Ses variations, 302 — 307. Différentes causes qui compliquent sa marche, 308 — 311.

Hygromètre de Saussure, 300.

Hygromètre de Deluc, 301.

Hygrométrie. Son objet, 297.

I. K.

Illusions d'optique, ou erreurs de la vue; combien elles sont multipliées, 1073. Convergence apparente des deux rangées d'arbres qui forment une avenue, 1074. Du plafond et du parquet d'une longue galerie, *ibid.* Autres illusions, 1075 — 1077. Pourquoi la lune nous paraît plus

grande à l'horizon qu'au méridien, 1079—1080. Illusions qui ont leur source dans le mouvement, 1081 et suiv. Explication de celle qui est relative à l'aberration des étoiles, 1086—1089.
Images des objets. *Voyez* Vision.
Impénétrabilité. En quoi elle consiste, 20.
Inclinaison de l'aiguille aimantée, 782.
Inertie. Sa véritable notion, 17—19.
Inflexion de la lumière; provient des attractions et répulsions que les corps exercent sur la lumière, à de petites distances, 922—924.
Instrumens à vent. Théorie de la propagation du son déduite de la manière dont il est produit dans ces instrumens, 498 et suiv.
Instrumens d'optique. Description de ceux qui sont les plus remarquables, 1211.
Intervalles de facile réflexion, où distances de la première surface d'un milieu, qui s'accordent avec les dispositions d'un rayon à être réfléchi plutôt que réfracté, 1009.
Intervalles de facile transmission, ou distances de la première surface d'un milieu, qui répondent aux dispositions d'un rayon à être transmis plutôt que réfléchi, 1009.
Iris. *Voyez* Arc-en-ciel.
Isolés (Corps). *Voyez* Électricité.
Kilogramme. Poids qui équivaut à 2 livres, 5 gros, 35 grains de l'ancien poids de marc, 68.

L.

Laiton. Sa densité surpasse la somme des densités du cuivre et du zinc dont il est composé, 22.
Lances, lampes, torches ardentes. *Voyez* Aurore boréale.
Lanterne magique. Sa description. 1233.
Lentille. *Voyez* Verre lenticulaire.
Liquides. État des corps que l'on appelle ainsi, 192. Leur conversion en fluide élastique, 195—197.
Liquidité. *Voyez* Liquides.
Liquidité. Passage des corps à cet état, 192—194.
Litre. Unité des mesures de capacité, dans le nouveau système métrique, 67.
Lumière. Services qu'elle nous rend, 839. Combien la théorie de ses phénomènes est délicate, 1241. Avantage que présente la théorie de la lumière, en ce que la marche de ce fluide est géométrique, 840. Exposé des deux hypothèses dont l'une fait consister la lumière dans une émanation des corps lumineux, et l'autre dans un fluide mis en vibration par l'action des mêmes corps, 842. Raisons qui établissent la préférence en faveur de la première hypothèse, 843 et 844.
L'intensité de la lumière sur un espace donné est en raison inverse du carré de la distance au corps lumineux, 845. La privation de la lumière produit l'ombre, 846. Effets de l'ombre projetée par un corps globuleux opaque situé en présence d'un corps lumineux de la même forme, 847 et suiv. Pénombre ou passage gradué de la lumière à l'ombre pure, 851. Principe sur lequel est fondée la gnomonique, *ibid.* Vîtesse de la lumière, regardée d'abord comme instantanée, 853. Observations qui ont servi à la déterminer, *ibid.* Rapports et différences entre la lumière et le calorique, 1041 et suiv.
Lumière décomposée. *Voyez* Couleurs.
Lumière infléchie. *Voyez* inflexion de la lumière.
Lumière réfléchie. *Voyez* Réflexion de la lumière. Effets de la lumière réfléchie relativement à la vision qui a lieu par l'intermède des miroirs. *Voyez* Miroirs.
Lumière réfractée. Loi à laquelle elle est soumise. *Voyez* Réfraction de la lumière. Effets de la lumière réfractée relativement à la vision dans les milieux terminés par des faces planes, 1136. Détermination du point qui est comme le centre d'action des rayons qui, en partant d'un point radieux situé dans l'intérieur d'un milieu réfringent,

se sont réfractés en passant dans un autre milieu, 1136 et 1137. Phénomènes produits par la réfraction, relativement à la vision des objets plongés dans l'eau, 1138—1141.
Lumière zodiacale, 856.
Lune. Explication de l'illusion qui nous la fait juger plus grande à l'horizon qu'au méridien, 1079 et 1080.
Lunette à quatre verres. Sa description, 1204 et suiv. Pourquoi on est obligé de la raccourcir ou de l'alonger, suivant que les objets sont plus ou moins éloignés, 1205. Pourquoi les objets que l'on regarde à travers les lunettes, ne paraissent pas sensiblement plus grands, que quand on les voit, sans intermède, à une distance ordinaire, 1206.
Lunette achromatique. Son effet en général, 1218. Histoire de sa découverte, 1214. et suiv. Théorie de ses effets, 1219. et suiv. Manière dont est composé son objectif, 1225. Elle ne corrige l'aberration de réfrangibilité que par rapport à cet objectif, 1226.
Lunette astronomique. Sa description, 1201.
Lunette batavique, ou lunette de Galilée. Sa description, 1202 et 1203.
Lunettes à lire. Leur découverte, 1133. Leurs effets, 1189.

M.

Machine électrique. Principes sur lesquels est fondée sa construction, 524.
Machine pneumatique. Sa description, 393.
Machines à vapeur. Explication de leurs effets, 386 et suiv.
Magnésie boratée; ses cristaux acquièrent huit pôles électriques, à l'aide de la chaleur, 625. Corrélation remarquable entre les positions des mêmes pôles et les formes des parties dans lesquelles ils résident, *ibid.*
Magnétisme, 720 et suiv. A quoi se réduisaient les connaissances des anciens sur cet objet, 721. Premières théories pour expliquer les effets des aimans, 722. Rapports entre la théorie du magnétisme et celle de l'électricité, 723. Différence entre les deux fluides électrique et magnétique, 724. Hypothèse de deux fluides considérés comme principes composans du fluide magnétique, 725. Analogie entre les aimans et les corps idio-électriques, 726 et 730. Quel est celui des deux pôles d'une aiguille aimantée que l'on doit appeler *pôle austral*, et celui qui doit porter le nom de *pôle boréal*, 729. Conséquence qui en résulte relativement aux dénominations des deux fluides, *ibid.* Expériences qui prouvent que les actions magnétiques suivent la raison inverse du carré de la distance, 732—736. Attractions et répulsions magnétiques, 737 et suiv. Equilibre de deux morceaux de fer dans l'état naturel, 738. Attraction mutuelle de deux aimans par leurs pôles de différens noms, et répulsion par ceux de même nom, 739. Action d'un aimant sur un barreau qui était primitivement à l'état naturel, 740. Accroissement de force qui a lieu dans un aimant dont on se sert pour communiquer le magnétisme à un barreau de fer, 741 et 742. L'action magnétique se transmet librement à travers les corps non susceptibles de l'acquérir, 745. Explication de plusieurs phénomènes qui dépendent des attractions et répulsions magnétiques, et dont plusieurs ont un air de paradoxe, 746 et suiv. Distribution des fluides magnétiques dans l'intérieur d'un aimant, 755—758. Explication d'un phénomène singulier, qui consiste en ce qu'une partie détachée d'un aimant se trouve elle-même être un aimant complet qui a ses deux moitiés sollicitées par des forces égales et contraires, 759 et 760. Communication du magnétisme, 761 et suiv. Points conséquens; en quoi ils consistent, 762 et 763. Renversement des pôles d'une

d'une aiguille, 764. Méthode d'aimanter par un seul contact, 767. Description de la méthode du double contact, 768. Condition pour que son effet parvienne au *maximum*, 770 et 771. Procédé d'AEpinus pour l'employer d'une manière plus avantageuse, 772. Autre manière, adoptée par Coulomb, qui pare à l'inconvénient des points conséquens, 773. Manière de se procurer des barreaux fortement aimantés, 774. Manière d'aimanter une aiguille de boussole, *ibid.* Aimans artificiels, leur construction, 775. Leurs puissans effets, *ibid.* Armures des aimans naturels, en quoi elles consistent, 776—778. Conditions requises, relativement à leur épaisseur, pour qu'elles produisent le plus grand effet possible, 779. Expériences qui sembleraient prouver que tous les corps sont susceptibles d'obéir à l'action du magnétisme, 832.

Magnétisme du globe terrestre. *Voyez* Globe terrestre et aiguille aimantée.

Magnétisme des mines de fer. *Voyez* Mines de fer.

Manomètre. Idée de cet instrument, 263, note 3.

Marmite de Papin. Ses effets, 211.

Masse. Ce qu'on entend par ce mot, 7.

Mercure. Premières expériences sur sa congélation, 376. Détermination du véritable degré auquel elle répond, 377. Avantages de son emploi dans la construction du thermomètre, 253 et 254. Expériences qui prouvent qu'il ne fait point exception à la loi des tubes capillaires, 331 et 332.

Méridien magnétique. Ce qu'on entend par ce nom, 781.

Mesures (nouvelles). Exposé de leur système, 63.

Métaux. Comparaison de ceux qui sont le plus en usage, relativement à leur élasticité, leur ductilité et leur dureté, 98. Bons conducteurs de la chaleur, 160. Réfléchissent le calorique rayonnant lorsqu'ils sont polis, 145. Leur cristallisation à l'aide du refroidissement qui suit la fusion, 379. Sont de bons conducteurs de l'électricité, 518.

Météores, 441. Météores aqueux; leur description, 447 et suiv.

Mètre. Unité des mesures linéaires dans le nouveau système métrique, 59.

Mica. Moyen employé pour déterminer l'épaisseur extrêmement petite d'une lame de cette substance, qui réfléchissait le bleu pur, 1000.

Microscope à deux verres. Sa description, 1227. Avantages de ces sortes d'instrumens, 1228.

Microscope simple. Ses effets, 1196 et suiv.

Microscope solaire. Sa description, 1239 et 1240.

Milieu. Quels sont les corps que l'on appelle ainsi, 868.

Minéraux. Comment se fait leur accroissement, 103. Différence remarquable qui les distingue des êtres organiques, *ibid.*

Mines de fer, leur magnétisme, 818 et suiv. Explication de l'espèce de renversement que présentent quelquefois les pôles des morceaux détachés de ces mines, *ibid.* Expériences à l'aide desquelles on a reconnu que la plupart des cristaux de fer que produit la nature, sont de véritables aimans, 820 et suiv.

Minium ou oxide rouge de plomb. Son usage pour la fabrication du flint-glass, 1225.

Miroir. Ses propriétés, 1090.

Miroir concave. Ses effets en général, 1100. Caustiques produites en vertu des intersections des rayons réfléchis sur la surface d'un miroir concave, lorsque les rayons incidens partent d'un même point radieux, 1101 et suiv. Mouvemens des caustiques, tandis que le point radieux s'approche ou s'éloigne de la surface réfléchissante, 1103—1106. Application aux différens cas où les images sont vues en deçà ou au-delà de la surface du miroir, 1107 et suiv. Usage du miroir concave dans la construction des télescopes, 1122. Effets du même miroir pour enflammer, fondre ou vitrifier les corps exposés à son foyer, 1123. Expérience dans laquelle on réunit les effets de deux miroirs concaves, 1124. Substitu-

tion de plusieurs miroirs plans à un miroir concave, 1125 et 1126. Comment il paraît que l'on doit entendre ce qu'ont dit les anciens du moyen employé par Archimède pour brûler la flotte des Romains, 1125.
Miroir conique. Ses effets, 1132.
Miroir convexe. Formation des caustiques produites derrière la surface d'un miroir convexe, aux endroits où s'entrecoupent les prolongemens des rayons qui, en partant d'un point radieux, se sont réfléchis sur la même surface, 1128. Effets du miroir convexe, 1129—1131.
Miroir cylindrique. Ses effets, 1132.
Miroir plan, représente les images à la même distance, derrière sa surface, que celle où l'objet se trouve en deçà, 1091. Il la représente aussi de la même grandeur et dans la même position, 1092. Nous ne pouvons voir dans un miroir plan, qu'une partie de nous-mêmes, dont la hauteur soit double de celle du miroir, *ibid.* Connaissant la distance de l'œil au miroir, et les hauteurs du miroir et de l'objet, on peut déterminer la distance à laquelle l'objet sera vu tout entier dans une position parallèle à celle du miroir, 1093. Mouvemens de l'image, doubles de ceux du miroir, 1094 et 1095. Explication de l'effet qui a lieu, lorsqu'en inclinant le rayon visuel on aperçoit, à l'aide d'un miroir, plusieurs images d'un même objet, 1097 et 1098.
Mobilité. En quoi elle consiste, 13.
Molécules élémentaires des minéraux, 112.
Molécules intégrantes des cristaux, 112 et suiv.
Molécules qui réfléchissent ou réfractent la lumière; de quel ordre elles sont, 9099.
Molécules soustractives des cristaux, 135.
Mollesse. En quoi elle diffère de la ductilité, 101.
Moulin à vent. Manière dont le vent agit pour faire tourner les ailes de cette machine, 440, note 1.
Moussons, vents périodiques, 434.
Mous (corps), 88.
Mouvement. Ses différentes espèces, 14.
Myopes. En quoi consiste le défaut de la vue, chez ceux à qui on a donné ce nom, 1194. Comment on pare à ce défaut, *ibid.* Diverses habitudes des myopes, 1195.

N.

Nature. Dans quelle acception ce mot doit être pris, iv; sentiment que nous inspire, envers l'Être-suprême, la véritable manière d'envisager la nature, *ibid.*
Neige. Sa formation, 454.
Nickel. Il paraît posséder par lui-même les propriétés magnétiques, 823 et 824. Sa vertu magnétique comparée à celle de l'acier, *ibid.*
Noirs (corps), sont ceux qui absorbent presque toute la lumière qui arrive à eux, 978.
Nuages. Leur formation, 448.

O.

Objectif. Celui des verres d'un instrument d'optique, qui est tourné vers l'objet, 1201.
Oculaire. Celui des verres d'un instrument d'optique, qui est tourné vers l'œil, 1201. Il est quelquefois double ou triple, 1204.
Odeur électrique, 578.
Odeurs, prouvent à quel point la matière est divisible, 25.
Œil. Combien cet organe est admirable, 1054. Description de sa structure, 1055.
Ombre, 846. Conditions qui en déterminent la figure, 847—852. Son usage pour mesurer à-peu-près la hauteur d'une tour, 852, note 1.
Opacité. Quelles en sont les causes, 1015.
Opale. Cause des beaux reflets colo-

rés qu'elle lance de son intérieur, 1004.
Optique. Science de la lumière directe, 841.
Or. Combien il est divisible et susceptible d'extension, par les procédés des arts, 26. Rang qu'il occupe dans l'ordre des principales propriétés des métaux les plus usuels, 98. Comment on remédie à l'inconvénient qu'auraient les ouvrages faits avec l'or, de perdre aisément leur fini, si on l'employait pur, 100.
Oreille. Finesse de tact de cet organe, 514. Comment divers sons simultanés arrivent, sans se confondre, à l'oreille, qui en discerne les différentes impressions, 512 et 513.
Oscillations (petites) des différens points d'une corde qui rend un son, 467. Des diverses parties d'un timbre qui résonne, 468. Petites oscillations de l'air produites par celles des corps sonores, 467. Leur considération appliquée à la théorie de la propagation du son, 498 et suiv. Petites oscillations qui produisent des cercles qui s'entrecoupent sur la surface de l'eau où l'on a jeté plusieurs pierres, 513.
Ouverture d'un télescope, 1208.
Oxidation. Celle qui a lieu par rapport aux disques métalliques de la pile de Volta, n'influe pas sensiblement sur la production de l'électricité, 715 et suiv.
Oxygène, un des principes de l'eau, 294.
Oxygène (gaz), un des principes de l'air, 391.

P. Q.

Paon. Cause des changemens que subissent les couleurs qui embellissent son plumage, suivant les différentes positions de l'œil, 1006.
Paratonnerres. Leur construction et leurs effets avantageux, 610 et suiv.
Particules des corps, sont transparentes, même celles des corps opaques, 996. De quel ordre sont celles qui réfléchissent les couleurs propres aux différens corps, 999.
Pendule compensateur, 245.
Pénétration apparente dans le mélange de certains corps, 22.
Pénombre. Passage gradué de la lumière à l'ombre pure, 851.
Perspective. En quoi elle consiste, et quelle est la cause de l'illusion qu'elle produit en nous, et dont l'effet est le même, jusqu'à un certain point, que si nous avions devant les yeux l'objet qu'elle représente, 1078.
Pesanteur. En quoi elle consiste, 32. Opinion de Descartes sur sa cause, 33. Sa différence avec le poids, 34. Egalité des temps que tous les corps emploient à tomber de la même hauteur dans le vide, 36. Loi du mouvement accéléré que la pesanteur produit dans les corps, 35 et suiv. Idée des découvertes auxquelles Newton a été conduit par le principe de la pesanteur, 39. Diminution de la pesanteur, insensible à toutes les hauteurs auxquelles l'homme peut atteindre, 43. Pesanteur des corps les uns vers les autres, détruite par l'action que le globe exerce sur eux, 44.
Pesanteur spécifique. En quoi elle consiste, 45. Principe sur lequel est fondée sa détermination, 46. Utilité des connaissances qu'elle procure, 51. Expériences relatives à la manière de la déterminer, 49 et suiv.
Physique. Son objet, 1. Points de contact entre cette science et la chimie, ij. Manière de la traiter, qui a été adoptée dans cet ouvrage, xxvj. Ordre qui a été suivi dans la distribution des connaissances que présente le même ouvrage, ix et suiv.
Pile de Volta, 651 et suiv.
Piles secondaires, 685 et suiv.
Pistolet électrique. Explication de son effet, 576.
Plateau collecteur d'un condensateur, 607.
Platine. Le plus dense des métaux connus, 51. Ses avantages pour la construction des miroirs de télescopes, 1122.
Plomb. Rang qu'il occupe dans l'ordre des principales propriétés des métaux les plus usuels, 98. Usage de son oxide rouge, dans la fabri-

cation du flintglass, employé pour les lunettes achromatiques, 1225.
Pline. Circonstances qui la déterminent, 453.
Poids. En quoi il diffère de la pesanteur, 34.
Poids (unité de) relative au nouveau système métrique. Méthode qui a été suivie dans sa détermination, 59 et suiv.
Point d'émergence, ou celui par lequel un rayon de lumière sort d'un milieu, 868.
Point d'immersion, ou celui par lequel un rayon de lumière entre dans un milieu, 868.
Pointes. Leur pouvoir pour lancer ou soutirer le fluide électrique, 570 et suiv.
Points cardinaux, 433.
Points conséquens d'un aimant, 762 et 763; — de certains corps électriques par la chaleur, 765.
Poissons électriques. *Voyez* Torpille, Anguille de Surinam et Silure trembleur.
Pôles électriques, 616.
Pôles magnétiques, 729.
Pompes, 407 et suiv. — foulantes, 408 et 409. — aspirantes, 410. Moyen de remédier à un vice de construction auquel elles sont sujettes, *ibid.* — aspirantes et foulantes, 411.
Porosité, 7. Expériences qui servent à la prouver, 8 et 9.
Poteries. Inconvéniens qui résultent de ce qu'elles conduisent difficilement la chaleur; on ne peut les diminuer qu'aux dépens de la solidité, 247.
Pouvoir absorbant et pouvoir émissif des corps, relativement au calorique, 152.
Presbites. En quoi consiste le défaut de la vue chez ceux à qui on a donné ce nom, 1189. Moyen d'y remédier, *ibid.*
Prisme destiné aux expériences sur la lumière, 927 et 928. Position sous laquelle l'image du spectre solaire produite par le prisme devient stationnaire, 929. Explication des apparences que présentent les objets vus à travers un prisme, 953.
Propagation de la chaleur, par l'intermède des corps solides; loi à laquelle elle est soumise, 175 et 176.
Propagation de la lumière. *Voyez* Lumière.
Propagation du son. *Voyez* Son.
Propriétés les plus générales des corps, 2 — 28.
Puissance ou force. Ce que l'on entend par ce mot, 13.
Puissance réfractive d'un corps; méthode employée par Newton pour la déterminer, 907. Celle des corps combustibles est plus grande, à densité égale, que celle des corps non combustibles, 908. Conséquences que Newton a déduites de cette différence par rapport à la nature du diamant et à celle de l'eau, 909 et 910. Analogie entre la puissance réfractive des corps et leur composition chimique, 911 et suiv. Méthode de Biot, pour déterminer la puissance réfractive de la molécule d'un corps, 913. Conséquences déduites de cette détermination, relativement à l'action du gaz hydrogène, 914. Relativement à la composition chimique de différens corps, 916 et suiv.
Qualités occultes des anciens. On a accusé sans fondement les modernes de les avoir renouvelées, 904.
Quantité de mouvement. En quoi elle consiste, 16.

R.

Rayon d'aberration, relatif à la double réfraction, 1146.
Rayon de lumière. En quoi il consiste dans chacune des deux hypothèses relatives à la propagation de la lumière, 842.
Rayon ordinaire, relatif à la double réfraction, 1146.
Rayon sonore, 470.
Rayons calorifiques. Expériences qui semblent indiquer que les rayons colorés du spectre solaire sont mêlés

de rayons simplement calorifiques, 1051. Nouvelles expériences qui infirment les précédentes, 1052.
Rayons efficaces, ou rayons d'une couleur déterminée, qui, après s'être réfractés et réfléchis dans les gouttes de pluie, où se peint l'arc-en-ciel, sont plus condensés à leur point d'émergence que ceux des autres couleurs, 957 et 961. Valeurs des angles qui déterminent leurs effets, 963.
Réflexion de la lumière; se fait sous un angle égal à celui d'incidence, 857. Ses effets lorsqu'elle rencontre une surface plane, 858 et 859. Lorsque la surface réfléchissante est concave et sphérique, 860 et suiv. Lorsque la surface est convexe et sphérique, 865 et suiv. Rapports entre la réflexion et la réfraction, 887—889. Raisons de croire que la réflexion de la lumière dépend d'une certaine force répandue uniformément sur la surface des corps et qui agit à une très-petite distance, 881 — 894.
Réfraction de la lumière, 868. Se fait de manière que, pour un même milieu, le sinus de l'angle de réfraction est en rapport constant avec celui d'incidence, 869. Sa loi inutilement cherchée par Kepler, 1034; découverte par Snellius, *ibid.* Descartes substitue au rapport des co-sécantes celui des sinus, *ibid.* Effets de la réfraction considérée dans les milieux terminés par des surfaces courbes, 871, et suiv. Cas où le milieu est terminé par une seule surface courbe, 872 et suiv. Cas où le milieu est terminé par deux surfaces courbes opposées, 881 et suiv. Rapports entre la réfraction et la réflexion, 887—889. Idées des Physiciens pour ramener la réfraction aux lois de la mécanique, 896. Explication de la réfraction à l'aide de l'attraction dans les petites distances 897—899. Démonstration du rapport constant entre les sinus d'incidence et de réfraction, 898, note 1. Explication du cas où la réfraction se change en réflexion totale, 900. Vues de Newton sur la réfraction et la réflexion considérées comme ayant une même cause, 901 —904. Réfraction à travers les corps combustibles plus forte à densité égale, que dans les corps non-combustibles. *Voyez* puissance réfractive.
Réfraction (double). Sa découverte, 1142. Difficultés que présente sa théorie, *ibid.* Effets généraux qu'elle produit lorsqu'on emploie un ou deux rhomboïdes de chaux carbonatée, 1144 — 1151. Explication d'un phénomène qui trompe l'attente de l'observateur, 1152. Expérience dans laquelle on voit à volonté deux ou quatre images d'un même point à travers deux rhomboïdes, 1153. Théorie d'Huyghens, 1154. Théorie de Newton, 1155. Théorie des physiciens qui ont cru pouvoir ramener la seconde réfraction aux lois ordinaires, 1156 — 1158. Difficulté d'accorder cette théorie avec l'observation, 1159. Observations sur les théories d'Huyghens et de Newton, 1160 — 1164. Détermination approchée de la loi du phénomène, 1165 et 1166 Explication du fait qui consiste en ce que l'une des deux images vues à travers un rhomboïde paraît beaucoup plus éloignée de l'œil que l'autre, 1167. Détails sur la double réfraction de différentes substances naturelles, 1170. Idée de Newton, sur la cause physique du phénomène dont il s'agit, 1173.
Réfraction moyenne; en quoi elle consiste, 1219.
Refroidissement; loi à laquelle il est soumis, 174. Influence de certains enduits pour en faire varier le progrès, 177. Influence de l'agitation de l'air sur sa durée, 178. Différence entre son effet et celui de la compression, 228 et 229.
Répulsion. Effets qui ont suggéré l'idée de ce mot, 30.
Répulsions électriques, 557 et 566.
Répulsions magnétiques, 737.
Réservoir commun, 526.
Résonnance (triple) des corps sonores, 486.
Ressort de l'air. *Voyez* Air.
Ressort d'une montre. Comment on

corrige l'effet de son affaiblissement, tandis qu'il se débande, 95.
Ressorts; leur utilité, 95.
Rétine Membrane qui tapisse le fond de l'œil, 1055.
Rose des vents. Sa description, 433.
Rosée. Son explication, 451. On voit quelquefois dans celle qui humecte l'herbe d'une prairie une copie de l'arc-en-ciel, 975.
Ruban de Volta; ce qu'on entend par ce mot, 689.
Rumbs des Vents, 433.

S.

Savon alkalin; ses effets particuliers, relativement à la transmission de l'électricité galvanique, 695.
Sciences. Division générale de celles qui ont pour objet l'étude de la nature, en physique, chimie et histoire naturelle; sous quel point de vue chacune de ces sciences considère la nature; points de contacts qu'ont entre elles les mêmes sciences. 1 etij.
Sel marin. Son extraction favorisée par une évaporation préalable, 442.
Sels neutres. Raison pour laquelle les nouveaux produits qui se forment, lorsque ces sels font échange de leurs bases, sont encore à l'état neutre, 80 et 81.
Silure tremblеur. Espèce de poisson électrique, 705
Siphon; son effet est dû à la pression de l'air, 412.
Solidité. Ce qu'on entend par ce mot, 6. Retour des fluides ou des liquides à cet état, 198 — 200 :
Son. Il résulte d'un mouvement de vibration imprimé à l'air par les corps sonores, 467 et 468. Effets de ce mouvement sur l'eau renfermée dans un verre dont on frotte les bords avec un doigt mouillé, 469. L'air est le véhicule du son, 471 — 474. L'eau et différens corps solides sont aussi susceptibles de le transmettre, 474 et 475. Vitesse du son, 477. Idée d'après laquelle on peut concilier avec les résultats de l'observation ceux de la théorie qui donnait la vitesse du son trop petite, 478. Différentes vitesses du son, suivant les divers corps qui le transmettent, 479. Réflexion du son; ses effets dans les lieux clos, 480. Elle est la cause des échos, *ibid.* Propriété des voûtes elliptiques, relativement à la réflexion du son, 481.
Sons comparés, 482 et suiv. Principaux intervalles qui résultent de cette comparaison, 484. Cordes sonores; formule pour déterminer le nombre de leurs vibrations dans un temps donné, *ibid.* Triple résonnance d'une corde sonore, 486. Les trois sons que cette corde fait entendre sont les premiers termes d'une série infinie d'harmoniques, 487 — 490. Expérience de Tartini, 491 Autre expérience dans laquelle les deux parties d'une corde divisée par un obstacle léger, se soudivisent elles-mêmes en plusieurs portions égales, 492. Formation de la gamme en usage, par la réunion de trois accords parfaits, 494 Raison de la préférence accordée à cette gamme sur celle qui est comprise dans la série des harmoniques d'une corde sonore, 495. Nécessité d'altérer, au moyen du *tempérament*, les tierces et les quintes, dans l'accord des instrumens à cordes, 496 et 497. Théorie de la propagation du son, 498 et suiv. Manière dont les sons simultanés se propagent sans se confondre, 511 — 513. Diversité de nuances dans la qualité des sons rendus par différens corps, 514.
Sonomètre. 485.
Sons aigus, 483.
Sons comparés, 482.
Sons graves, 483.
Sons harmoniques, 492.
Spath d'Islande. Nom donné aux rhomboïdes transparens de chaux carbonatée. 1142.
Spectre solaire, ou image colorée du soleil, produite par la lumière qui a traversé un prisme, 933 et suiv. Différences que l'on a observées entre les rayons qui le composent, relativement à leurs facultés calorifiques, 1045 — 1049. Différences entre les mêmes rayons, par rapport à leur faculté éclairante, 1050.

Expériences qui ont paru indiquer l'existence d'un second spectre composé de rayons calorifiques, distingué de celui que donnent les rayons lumineux, 1051. Raisons de regarder ces expériences comme suspectes, 1052.
Sphère d'activité sensible, 72.
Stère. Mesure de solidité égale au mètre cube, 66.
Structure des cristaux. *Voyez* Cristaux.
Succin ou ambre jaune. L'électricité a emprunté son nom de celui d'*electrum* que portait cette substance, 515, note 1.
Sueur ou transpiration sensible, 10.
Système. Différentes acceptions de ce mot, viij. En quoi consiste le système pris par opposition à la théorie, et combien il est opposé à la véritable marche des sciences, *ibid.*
Système métrique (nouveau). Exposé succinct de sa distribution, 63—69.

T.

Tact. Comment son action se combine avec les impressions que reçoit l'œil, pour nous aider à juger des formes, des grandeurs et des distances des objets. 1058 et suiv.
Taffetas gommé. Manière dont il s'électrise à l'aide d'un corps appliqué par pression sur sa surface, 532.
Télescope. Sa découverte, 1133. D'où dépendent en général ses effets, 1200.
Télescope astronomique. Sa description et ses effets, 1201.
Télescope catadioptrique, 1212
Télescope dioptrique, 1207.
Télescope Grégorien. Sa description, 1213.
Télescope Newtonien. Sa description, 1211 et 1212.
Tempérament dans la musique; en quoi il consiste, 496 et 497.
Température; ce qu'on entend par ce mot, 138.
Temps. Comment il doit être considéré dans l'estimation de la vîtesse, 15. Rapport entre les temps et les espaces parcourus en vertu du mouvement accéléré dû à la pesanteur, 37.
Tendres (corps), 88.
Tension du calorique, 138.
Terre. Regardée long temps comme un des quatre élémens, 294. *Voyez* Globe terrestre.
Théorie. En quoi elle consiste, et combien elle contribue au progrès des sciences, v. Avantages des détails dans le développement d'une théorie, xxvj.
Thermomètre (idée du), 139 et 140. Son origine, 248. Conditions requises pour obtenir un bon thermomètre, 250. Avantages de l'emploi du mercure dans la construction de cet instrument, 253 — 256. Vérification de cet instrument, au moyen du thermomètre à mercure, 253; au moyen du thermomètre à air, 255. Pourquoi il est indifférent de laisser de l'air dans la partie supérieure du tube, 257.
Thermomètre centigrade, 254.
Thermomètre d'Amontons, 232.
Thermomètre de Delisle, 259.
Thermomètre de Farenheit, 258.
Thermomètre de Florence, 249.
Thermomètre de Réaumur; sa description, 251.
Thermomètre différentiel; sa description, 163.
Thermomètre moderne usité en France; manière de le construire, 252.
Thermoscope, sa description, 162. Circonstance remarquable où il reste stationnaire, 172 et 173.
Timbre. Vibrations de ses différens anneaux, lorsqu'on le fait résonner, 468.
Topaze. Exemple singulier d'un cristal de cette espèce, qui étant électrisé par la chaleur, avait des points conséquens analogues à ceux des corps magnétiques, 765.
Torpille, 699 et suivans. Description de son organe électrique, 700. Opinions des anciens physiciens sur la cause de la commotion qu'elle fait éprouver à ceux qui la touchent, 702 et 703. Expériences à l'aide desquelles on a reconnu que cette commotion était due à l'électricité, 704 et suivans. Idée de Walsh sur la

manière dont le fluide électrique agit dans cette commotion, 708. Idée de Volta sur l'analogie entre la combinaison des substances qui composent l'organe de la torpille et celle des corps dont la pile est l'assemblage, 709.
Torrens, leur cause, 459.
Toucher (sens du). *Voyez* Tact.
Tourmaline. Vertu électrique qu'elle acquiert à l'aide de la chaleur, 617. Son action sur les corps légers que l'on présente à l'un de ses deux pôles électriques, 618. Distribution des deux fluides électriques dans la même pierre, 619. Explication d'une espèce de paradoxe que présente sa manière d'agir sur un fil de soie électrisé, 620. Actions réciproques de deux tourmalines, 621. Variations dans les effets d'une tourmaline, suivant les divers degrés de chaleur qu'on lui fait subir, 622. Chaque portion d'une tourmaline que l'on a brisée manifeste deux pôles comme la tourmaline entière; explication de cet effet, 623. Corrélation entre les formes des deux sommets d'une tourmaline et les positions des pôles électriques, 624. Analogie entre une tourmaline devenue électrique par la chaleur et la pile de Volta, 664. Les phénomènes de la tourmaline ont indiqué le lien qui unit la théorie du magnétisme avec celle de l'électricité, 723.
Transparens (corps). Effets des accès de facile réflexion et de facile transmission dans ceux qui sont sans couleur, 1009—1012; et dans ceux qui sont colorés, 1017 et 1018.
Transpiration. Résultat de celle qu'on nomme *sueur*, comparé avec celui de la transpiration insensible, 10.
Trombe, sa description, 456.
Tubes capillaires. Idée générale des phénomènes qu'ils présentent, 312 — 317. Diverses causes dont on a fait dépendre ces phénomènes, 318 et suivans. Anciennes opinions sur ce sujet, 318. L'attraction dans les petites distances est la véritable cause de ces phénomènes, 319 et 320. Différentes manières dont Hauxbée, Jurin, Witbrecht et Clairaut ont essayé de les expliquer, 320 et 322. Leur véritable théorie, par Laplace, 323 et suivans. Action d'une masse de liquide sur une colonne située à l'intérieur, 324—332. Application de la théorie aux phénomènes des tubes capillaires, 853 et suivans. Cause de l'abaissement du mercure au-dessous du niveau, 331 et 332. Cas où le liquide est terminé par une surface cylindrique, 333 et 334. Circonstance dans laquelle l'eau s'élève au-dessus de son niveau, en formant une hyperbole, 335. Mouvemens des liquides dans les tubes capillaires d'une figure conique, ou entre deux lames inclinées sous un petit angle, 336 — 338. Effets de la capillarité sur les parois des corps qui renferment le liquide, 339—342. Application de la théorie aux attractions et aux répulsions apparentes des petits corps qui flottent sur un liquide, 343 et 344. Circonstances qui déterminent la concavité ou la convexité de la surface du liquide, 346—349. Influence du frottement sur la capillarité, 350—353. Analogie de divers effets connus avec ceux des tubes capillaires, 354 et 355.

U. V. Z.

Unité de poids. *Voyez* Poids.
Unité de temps, employée dans la considération du mouvement uniforme, 15.
Vapeurs, 195 et 203. Rapport suivant lequel elles se dilatent depuis la température de la glace fondante jusqu'à celle de l'eau bouillante, 237. Loi à laquelle sont soumises les forces élastiques des mêmes fluides, à mesure que les températures de ces fluides varient par des différences égales, 240 et 241. Leur quantité dans un espace donné est constante, par une même température, 261 — 267. Pesanteur spécifique de la vapeur de l'eau comparée à celle de l'air, 274. Accord de la théorie avec l'observation sur la capacité de l'air pour cette

vapeur, 275. Différence entre l'effet de la pression sur la vapeur, quand celle-ci est seule, et quand elle est unie à l'air, 279 — 288. Répulsion mutuelle entre les molécules de l'air et celles de la vapeur interposée, 289.
Vaporisation. En quoi elle consiste, 197. Ce qui la distingue de l'évaporation, *ibid.*
Vent d'est. Son explication, 435 et suiv.
Vents. Leur cause générale, 431. Observations sur leur vîtesse, 432. Leur diversité, 433 et suiv. Leur utilité, 439 et 440.
Vents alisés ou moussons, 434.
Vents généraux, *ibid.*
Vents irréguliers, *ibid.*
Vents périodiques, *ibid.*
Verre ardent; ses effets, 1190.
Verre biconcave; ses effets, 1191 et suivans.
Verre bicouvexe. *Voyez* Verre lenticulaire.
Verre lenticulaire, ou lentille, 881. Foyer des rayons qui tombent parallélement sur une lentille, 882. Effets de cette espèce de verre, relativement à la vision des objets situés en deçà du foyer des rayons parallèles, 1176. — 1180. Effets du même verre, lorsque l'objet est situé au-delà du foyer des rayons parallèles, 1181 et suiv.; cas où l'image est simple, 1181; cas où l'image est double, 1184. Illusion qui nous la fait paraître située derrière la lentille, *ibid.* Explication de ces effets, 1185 et 1186. Manière de dissiper l'illusion, 1187 et 1188. Action des rayons solaires réunis au foyer d'une lentille, 1190.
Verre lenticulaire nommé *microscope simple*; ses effets, 1196 — 1199. Globule de verre, ou goutte d'eau que l'on substitue quelquefois au verre lenticulaire, pour avoir un microscope simple, 1200.
Vessie natatoire des poissons. Son usage, 58.
Vibrations. *Voyez* Oscillations.
Vision aidée par l'art, 1090 et suiv.
Vision aidée par les instrumens composés de plusieurs verres. *Voyez* Lunette, Télescope et Microscope.
Vision à l'aide d'un seul verre terminé par des surfaces curvilignes. *Voyez* Verre lenticulaire et Verre concave.
Vision naturelle, 1053 et suivans. Manière dont les images des objets se forment au fond de l'œil, 1056. Secours que nous tirons du tact, pour nous aider à juger des formes, des grandeurs et des distances des objets, 1058 — 1061. Pourquoi les objets nous paraissent droits, quoique leurs images soient renversées sur la rétine, 1060. Pourquoi nous ne voyons pas les objets doubles, quoique chacun d'eux ait son image dans l'un et l'autre œil, 1064. Comment l'impression de la distance se combine avec celle de la grandeur apparente, pour produire en nous la sensation qui nous représente la grandeur réelle, 1062, 1065 et suiv. Circonstances dans lesquelles nous nous trompons sur l'estimation de la grandeur, 1069. Influence de la clarté des objets sur l'estimation de la distance, 1070. Comment les objets qui se trouvent entre nous et celui que nous regardons de préférence nous aident à estimer la distance de celui-ci, *ibid.* Exemples tirés de personnes opérées de la cataracte, qui prouvent combien l'œil est neuf dans l'art de voir, lorsqu'il donne accès à la lumière pour la première fois, 1071 et 1072. Illusions auxquelles la vue est sujette dans une multitude de circonstances, 1073 et suivans. *Voyez* Illusions d'optique.
Vîtesse. En quoi elle consiste, 15.
Vîtesse angulaire, 438, note 1.
Vitres des appartemens. Pourquoi elles sont mouillées en dedans lorsqu'il gèle, et en dehors par un temps de dégel, 452.
Vol des oiseaux. Moyens à l'aide desquels il s'exécute, 461.
Volume d'un corps. En quoi il consiste, 6.
Zinc. Densité de son alliage avec le cuivre, plus grande que la somme des densités particulières, 22. Étant isolé, il acquiert l'électricité vitrée par le frottement, 530.

Fin de la Table des Matières.

Suite du Catalogue des Ouvrages qui se trouvent chez le même Libraire.

Traité des Mouvemens apparens des Corps célestes, par Dionis du Séjour, 2 vol. in 4. 48 fr.

Exposition d'une Méthode pour construire les Equations indéterminées qui se rapportent aux Sections coniques, par Prony, in-4. 3 fr. 5 déc.

Description et usage d'un nouveau Cercle de réflexion, par Borda, in-4. 4 fr. 5 déc.

Recherches sur les Courbes à double courbure, par Clairant, in-4.

Traité des Fluxions par Maclaurin, 2 vol. in-4. 24 fr.

Introduction à l'Analyse des lignes courbes algébriques, par Gabriel Cramer, in-4.

Institutions de Géométrie, par Lachapelle, 2 vol. in-8. 10 fr.

Traité des Sections coniques et autres Courbes anciennes, par le même, in-8.

OEuvres de M. B. Goudin, contenant un traité sur les propriétés communes à toutes les courbes, un mémoire sur les éclipses du soleil, et un sur les usages de l'ellipse dans la trigonométrie sphérique, nouvelle édition in-4. 7 fr. 50 c.

Traité analytique des Sections coniques, par l'Hopital, vol. in-4. 12 fr.

Analyse des infiniment petits, par le même, in-4. 12 fr.

Essai sur l'application de l'Analyse aux probabilités des décisions rendues à la pluralité des voix, par Condorcet, vol. in-4. 15 fr.

Elémens d'Algébre de Léonard Euler, 2 vol. in-8. 10 fr.

Traité de Trigonométrie rectiligne et sphérique, par Cagnoli, in-4. 13 fr.

Elementi d'Algebra di Pietro Paoli, 2 vol. in-4. 21 fr.

Théorie des Equations algébriques, par Bezout, in-4. 18 fr.

La Langue des calculs, ouvrage posthume de Condillac. 4 fr.

Principiorum calculi differentialis et integralis expositio elementaris, auct. S. l'Huillier, in-4. 24 fr.

Mélanges Mathématiques, par Nieuport, 2 vol. in-4. 24 fr.

Traité de Mécanique, par Marie, in-4. 10 fr.

Introductio in Analysin infinitorum, auct. L. Eulero, 2 vol. in-4. 24 f.

Ejusd. institutiones calculi differentialis et calculi integralis, cum Supplementis, Ticini et Petropoli, 6 vol. in,4. 160 fr.

Ejusd. Mechanica, sive Motûs Scientia, 2 vol. in-4. 48 fr.

Masch. Adnotationes ad Calculum integralem Euleri, in-4. 9 fr.

Astronomie, par J. Lalande, troisième édit., 3 vol. in-4. 60 fr.

Abrégé d'Astronomie, par le même, in-8. 5 fr.

Histoire céleste française, par le même, in-4. 18 fr.

Théorie de la Lune, par Clairaut, seconde édit. in-4. 9 fr.

Théorie de la figure de la Terre, tirée des principes de l'Hydrostatique, par le même, in-8.

Perspective pratique, par L. Bretez, in-fol. 12 f.

Leçons élémentaires d'Optique, par Lacaille, in-8. 3 f.

Perspective théorique et pratique, par Ozanam, in-8. 5 fr.

Cours complet d'Optique, traduit de l'anglais de Robert Smith, par L. P. Pezenas, 2 vol. in-4. 24 fr.

Traité d'Optique, par M. Smith, traduit de l'anglais, et considérablement augmenté, par Duval-le-Roy. Breit, 1767, in-4. 24 fr.

Traité de Perspective linéaire à l'usage des artistes, par L. N. Lespinasse 26 planches

Architecture hydraulique, par Bélidor, 4 vol. 30 fr.

Tables de Logarithmes, à l'usage du Cadastre et des Elèves qui se destinent à l'Ecole Polytechnique. 2 f. 50 c.

609848

Fig. 71.

Fig. 72.

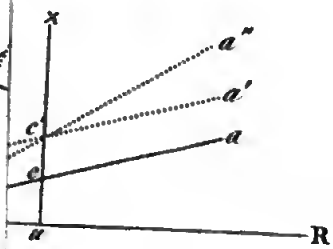


Fig. 77.

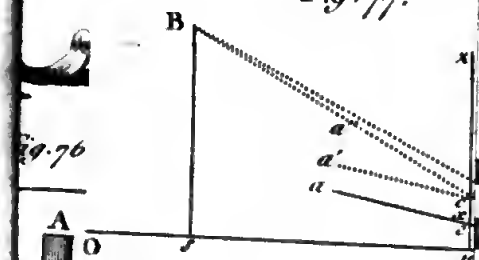
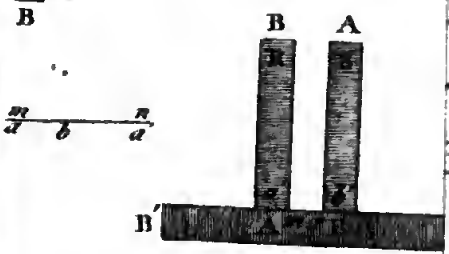


Fig. 76

Fig. 85.

Fig. 83.



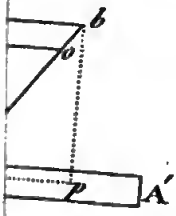
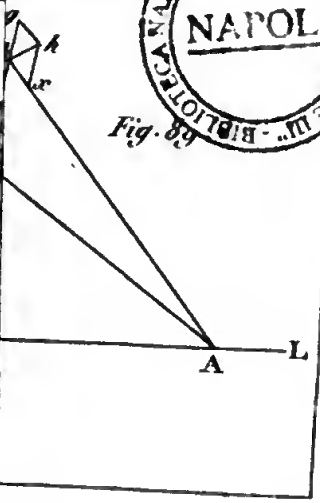


Fig. 89



BIBLIOTECA NAZIONALE "VITTORIO EMANUELE III" - NAPOLI

Digitized by Google

Fig. 93.

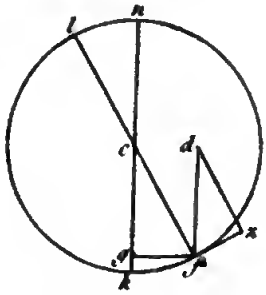
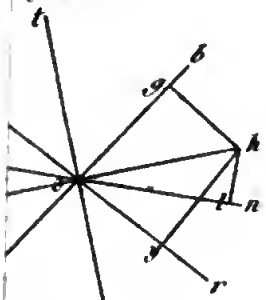
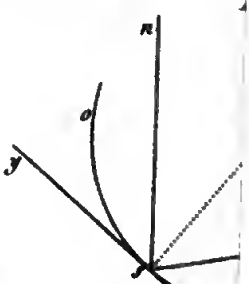


Fig. 94.





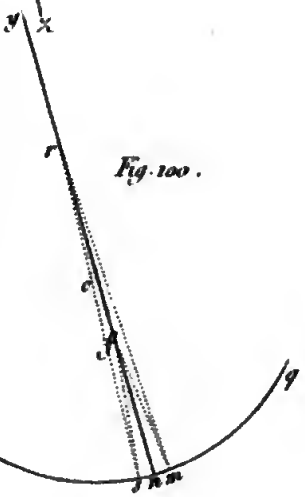
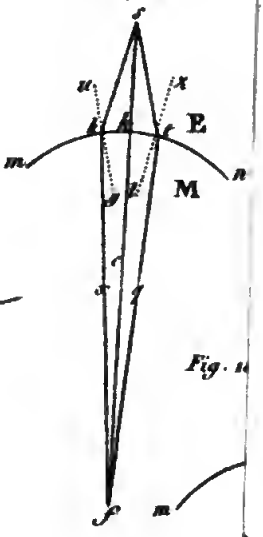


Fig. 103.



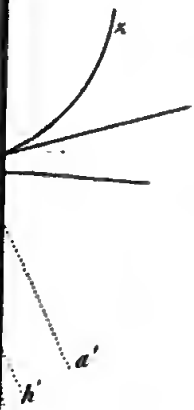
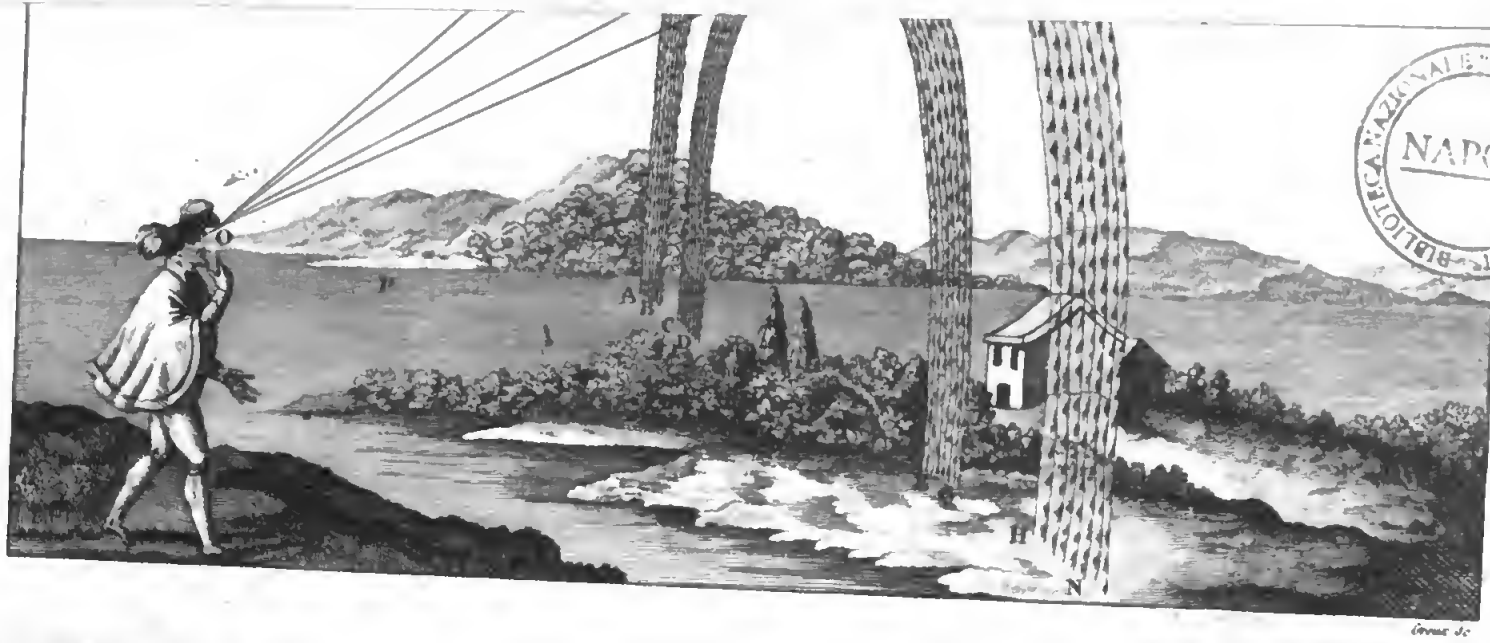


Fig. 1

Fig. 106.

NAPOLI

EMANUEL



BIBLIOTECA NAZIONALE
NAPOLI

Fig. 145.

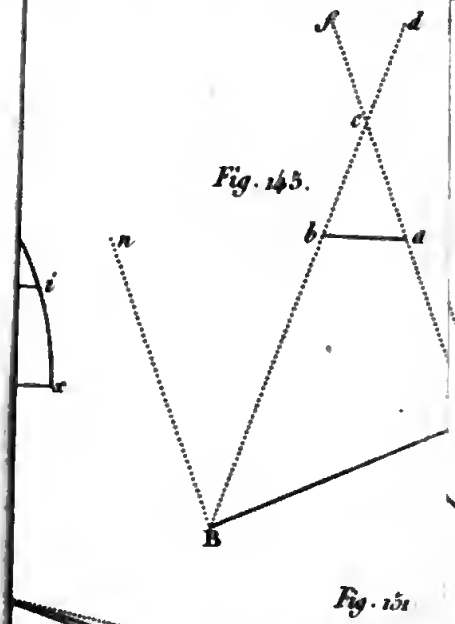
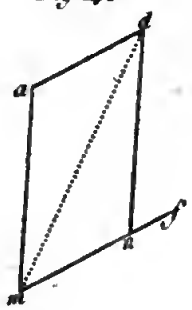


Fig. 148.



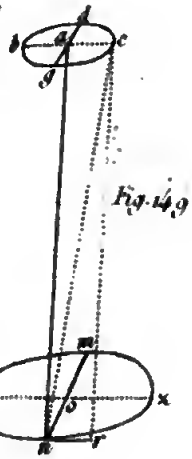


Fig. 149

Fig. 151

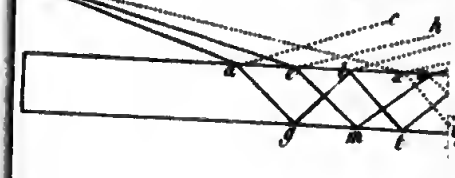
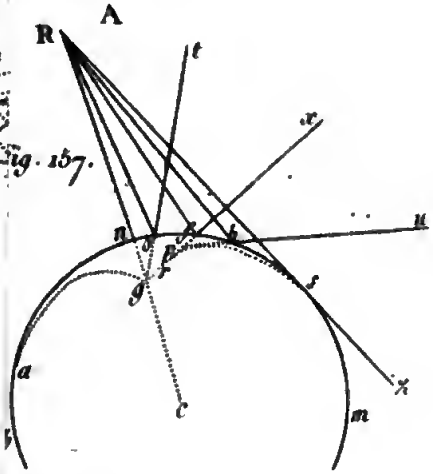
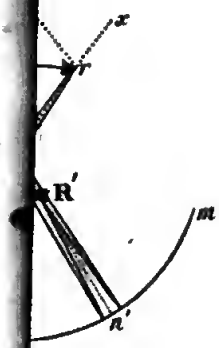


Fig. 157.

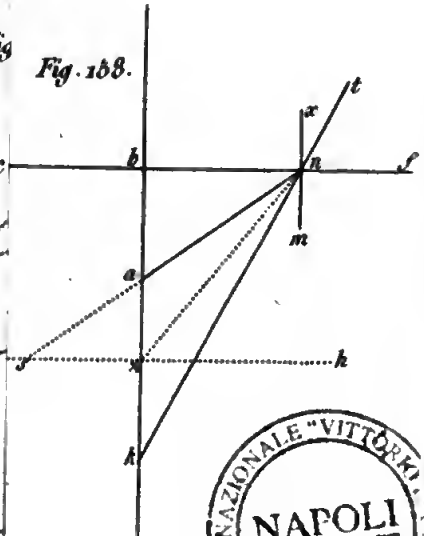


254.



Fig

Fig. 158.



BIBLIOTECA NAZIONALE "VITTORIO EMANUELE III"
NAPOLI

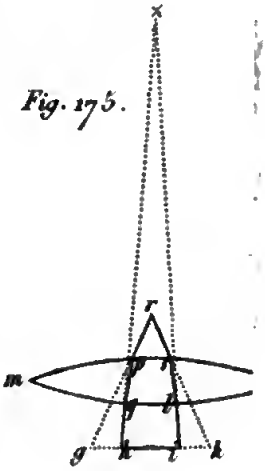


Fig. 175.

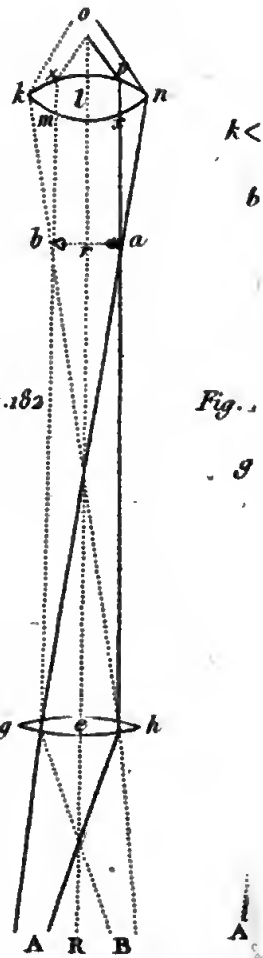


Fig. 182

k<

b

Fig. .

g